

A IMPORTÂNCIA DOS CLIMAS DE REFERÊNCIA NA SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

HENRIQUE CORDEIRO DE SOUSA GOUVEIA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

Coorientador: Professora Doutora Maria de Lurdes de Oliveira Simões

JUNHO DE 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

“Não há conhecimento que não tenha valor.”

Edmund Burke

AGRADECIMENTOS

Gostaria de apresentar o meu sincero agradecimento àqueles que me acompanharam e apoiaram, direta ou indiretamente, ao longo deste percurso que, sem os quais, não teria sido possível.

À minha orientadora, Professora Doutora Eva Barreira, pela oportunidade de trabalhar sob a sua orientação e pelo conhecimento, apoio e disponibilidade transmitidos durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À minha coorientadora, Professora Doutora Maria Lurdes Simões, pela orientação, conhecimento, disponibilidade e ajuda prestada, durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI) pelo fornecimento dos dados climáticos.

À minha família por toda a paciência, incentivo e apoio prestados para a concretização deste grande objetivo.

À Filipa por todo o companheirismo, ajuda, paciência e atenção dedicada.

Aos meus amigos e colegas de curso por todo o acompanhamento e apoio ao longo deste percurso académico.

RESUMO

As exigências de conforto e qualidade do ar interior, assim como de durabilidade e segurança dos edifícios têm vindo a adquirir, nas últimas décadas, uma maior relevância. A degradação precoce dos elementos construtivos, no que diz respeito a problemas de acumulação de humidade, tem normalmente por base o mau dimensionamento dos elementos que constituem a envolvente dos edifícios, contribuindo para um mau desempenho a nível higrotérmico e energético. Com o objetivo de contrariar o anteriormente referido, e de modo a diminuir o impacto socioeconómico que daí advém, é necessário entender e dar resposta às necessidades específicas de cada local através da utilização de soluções construtivas adequadas, tendo em atenção as condições climatéricas existentes.

Os modelos de simulação higrotérmica, permitem aos projetistas avaliar o desempenho higrotérmico dos edifícios, através da utilização de anos climáticos de referência que traduzam as condições climatéricas do local a avaliar. No entanto, uma questão-chave permanece na seleção da metodologia mais adequada para a determinação dos anos climáticos de referência, assim como na escolha dos mesmos.

No presente trabalho, foram recolhidos e tratados os dados climáticos provenientes da estação meteorológica do LFC/FEUP, referentes ao clima da cidade do Porto, e abordadas três metodologias distintas, para determinação do *Moisture Reference Year*. Posteriormente, foram avaliados os resultados dos vários métodos, tendo-se verificado alguma coerência, no que diz respeito aos anos considerados mais críticos (2014 e 2016), apesar de também terem sido observadas algumas divergências. Contudo, tendo em conta a série de dados analisada, determinou-se que o ano mais gravoso para riscos de acumulação de humidade, foi o ano 2014.

Foram também efetuadas simulações higrotérmicas para três tipologias de parede distintas fazendo variar as condições climatéricas exteriores através da utilização de dois anos climáticos de referência (*Moisture Reference Year* e *Test Reference Year*), determinados para o mesmo local. Uma análise estatística dos resultados foi realizada, identificando-se as dissimilaridades através da avaliação do teor de humidade existente em cada elemento construtivo, para cada tipologia de parede. Desta forma, apesar de em alguns casos, as variações do teor de humidade terem sido semelhantes entre a utilização dos dois anos climáticos de referência, concluiu-se que o *MRY* apresentou os resultados mais gravosos, sendo este o ano climático de referência mais adequando para as simulações higrotérmicas.

PALAVRAS-CHAVE: clima, análise estatística, *MRY*, simulação higrotérmica, teor de humidade

ABSTRACT

In recent decades, the demands for comfort and quality of indoor air, as well as the material's durability and safety of buildings have become more relevant. The early degradation of the construction elements, related to problems of moisture accumulation, is usually based on a low scaling of the elements that constitute the building envelope, contributing to a weak hygrothermal and energetic performance. In order to counteract the aforementioned, and to reduce the socio-economic impact that becomes from this, it is necessary to understand and respond to the specific needs of each location using suitable constructive solutions, having in consideration the existing climatic conditions.

Hygrothermal simulation models allows designers to evaluate the hygrothermal buildings performance by using reference years that reflects the local climatic conditions to be analyse. However, a key issue remains on the selection of the proper methodology for determination of the reference years, as well as its choice.

In this present work, were collected and treated climatic data from the LFC/FEUP weather forecast service, referring to Porto's city climate, and three different methodologies were used to determine the *Moisture Reference Year*. Subsequently, the results of the various methods were evaluated and some consistency was observed for the most critical years (2014 e 2016), although divergences were also observed. However, considering the data series analysed, it was determined that the most critical year for moisture accumulation problems, was the year 2014.

Then, hygrothermal simulations were carried out for three different types of wall, varying the external climatic conditions, using two reference years (*Moisture Reference Year* and *Test Reference Year*), determined for the same location. Finally, a statistical analysis of the results was made, evidencing the dissimilarities through the evaluation of the moisture content in each constructive element, for each wall typology. Thus, it was verified that, although in some cases, variations in moisture content were similar between the use of both reference years, it was concluded that the *MRY* presented the most severe results, therefore, the most appropriated choice is to use the *MRY* for hygrothermal simulations.

KEYWORDS: climate, statistical analysis, *MRY*, hygrothermal simulation, moisture content

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA.....	2
2. DADOS CLIMÁTICOS PARA A SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA	5
2.1. O CLIMA E A SUA IMPORTÂNCIA.....	5
2.1.1. CLIMA E TEMPO METEOROLÓGICO.....	5
2.1.2. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA SEGUNDO KOPPEN-GEIGER	7
2.1.3. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA SEGUNDO THORNTWAITE	9
2.2. ANOS CLIMÁTICOS DE REFERÊNCIA.....	12
2.2.1 DEFINIÇÃO DE ANOS CLIMÁTICOS DE REFERÊNCIA	12
2.2.2 ANOS CLIMÁTICOS DE REFERÊNCIA PARA CÁLCULOS ENERGÉTICOS	12
2.2.3. MOISTURE REFERENCE YEAR (MRY)	13
2.3. OBSERVAÇÕES FINAIS	17
3. TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS CLIMÁTICOS.....	19
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
3.2. METODOLOGIA APLICADA NA COLMATAÇÃO DE FALHAS	20
3.3. DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS.....	27
3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
4. CONSTRUÇÃO DO MOISTURE REFERENCE YEAR.....	39
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	39
4.2. METODOLOGIA APLICADA	39
4.2.1. DÉFICE DE SATURAÇÃO.....	39
4.2.2. MOISTURE INDEX	43
4.2.3. CLIMATIC INDEX	48

4.3. SELEÇÃO DOS ANOS CLIMÁTICOS DE REFERÊNCIA.....	52
4.4. REFLEXÕES FINAIS	57
5. ANÁLISE DA SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA.....	59
5.1. PROGRAMA DE SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA (WUFI).....	59
5.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	62
5.2.1 PAREDE SIMPLES COM ISOLAMENTO PELO INTERIOR	62
5.2.2 PAREDE SIMPLES COM ISOLAMENTO PELO EXTERIOR.....	66
5.2.3 PAREDE DUPLA COM ISOLAMENTO NA CAIXA-DE-AR	70
5.2.4 RELATIVE HUMIDITY AND TEMPERATURE INDEX (RHTI).....	73
5.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	75
5.3.1 NOTA INTRODUTÓRIA	75
5.3.2 PAREDE SIMPLES COM ISOLAMENTO PELO INTERIOR	76
5.3.3 PAREDE SIMPLES COM ISOLAMENTO PELO EXTERIOR.....	79
5.3.4 PAREDE DUPLA COM ISOLAMENTO NA CAIXA-DE-AR	82
5.4. SÍNTESE CRÍTICA	85
6. CONCLUSÃO	87
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Localização geográfica da cidade do Porto [8]	7
Figura 2 – Classificação climática de Koppen-Geiger [12]	8
Figura 3 – Classificação climática de Koppen-Geiger para Portugal Continental [3]	8
Figura 4 – Classificação climática de Thornthwaite de 1948, Moisture Index [13]	9
Figura 5 – Classificação climática de Thornthwaite de 1948, Thermal Efficiency Index [13]	10
Figura 6 – Classificação climática de Thornthwaite de 1948, para Portugal continental [14]	11
Figura 7 – Localização das estações meteorológicas [60]	20
Figura 8 – Colmatação da temperatura para períodos de falhas de 2 a 24 horas	21
Figura 9 – Colmatação dos valores da precipitação para períodos de falhas superiores a 2 horas cujas falhas eram coincidentes entre as duas estações	22
Figura 10 – Colmatação dos valores da radiação atmosférica para períodos de falhas superiores a 24 horas.....	23
Figura 11 – Diferenças entre os valores da radiação solar difusa medida e calculada ao longo do ano	24
Figura 12 – Dissemelhanças entre os valores da radiação solar difusa medida e calculada: a) dia 5 de julho de 2011, b) dia 22 de fevereiro de 2011.....	24
Figura 13 – Proximidade entre os valores da radiação solar difusa medida e calculada: a) dia 20 de julho de 2011, b) dia 23 de janeiro de 2011	25
Figura 14 – Percentagem de falhas existentes em cada ano e para cada parâmetro (à exceção da direção do vento).....	26
Figura 15 – Percentagem de falhas existentes em cada ano para a direção do vento.....	26
Figura 16 – Percentagem total de falhas existentes em cada ano	27
Figura 17 – Boxplot dos valores médios horários da temperatura [°C]	28
Figura 18 – Boxplot dos valores médios horários da humidade relativa [-]	29
Figura 19 – Boxplot dos valores médios horários da radiação atmosférica [W/m ²].....	30
Figura 20 – Boxplot dos valores médios horários da pressão atmosférica [hPa]	31
Figura 21 – Boxplot dos valores médios horários da radiação solar difusa [W/m ²].....	32
Figura 22 – Boxplot dos valores médios horários da radiação solar global [W/m ²].....	33
Figura 23 – Boxplot dos valores médios horários da precipitação [mm/h]	34
Figura 24 – Boxplot dos valores médios horários da velocidade do vento [m/s].....	35
Figura 25 – Boxplot dos valores médios horários da direção do vento [°].....	36
Figura 26 – Valores do défice de saturação [Pa] ao longo do ano 2013.....	41
Figura 27 – Valores do défice de saturação [Pa] ao longo do ano 2014	41
Figura 28 – Valores do défice de saturação [Pa] ao longo do ano 2015.....	42

Figura 29 – Valores do déficit de saturação [Pa] ao longo do ano 2016	42
Figura 30 – Ângulo entre a normal da parede e a direção do vento [45]	44
Figura 31 – Valores de DI e WI normalizados ao longo do ano 2012	45
Figura 32 – Valores do Moisture Index ao longo do ano 2012	46
Figura 33 – Valores de DI e WI normalizados ao longo do ano 2014	46
Figura 34 – Valores do Moisture Index ao longo do ano 2014	47
Figura 35 – Valores de DI e WI normalizados ao longo do ano 2016	47
Figura 36 – Valores do Moisture Index ao longo do ano 2016	48
Figura 37 – Valores de Epen e do índice WDR ao longo do ano 2013	51
Figura 38 – Valores de Epen e do índice WDR ao longo do ano 2014	51
Figura 39 – Valores de Epen e do índice WDR ao longo do ano 2016	52
Figura 40 – Valores da temperatura [°C] ao longo do ano 2014 (MRY)	54
Figura 41 – Valores da humidade relativa [-] ao longo do ano 2014 (MRY)	54
Figura 42 – Valores da radiação atmosférica [W/m ²] ao longo do ano 2014 (MRY)	55
Figura 43 – Valores da pressão atmosférica [hPa] ao longo do ano 2014 (MRY)	55
Figura 44 – Valores da radiação solar global [W/m ²] ao longo do ano 2014 (MRY)	56
Figura 45 – Valores da precipitação [mm] ao longo do ano 2014 (MRY)	56
Figura 46 – Valores da velocidade do vento [m/s] ao longo do ano 2014 (MRY)	57
Figura 47 – Predominância da direção do vento ao longo do ano 2014 (MRY)	57
Figura 48 – Configuração da parede simples com isolamento pelo interior	60
Figura 49 – Configuração da parede simples com isolamento pelo exterior	60
Figura 50 – Configuração da parede dupla com isolamento na caixa-de-ar	61
Figura 51 – Boxplot dos resultados da simulação para uma parede simples com isolamento pelo interior (MRY e TRY): a) temperatura na superfície exterior [°C], b) humidade relativa na superfície exterior [%]	63
Figura 52 – Boxplot dos resultados da simulação para uma parede simples com isolamento pelo interior (MRY e TRY): a) teor de humidade na camada de reboco exterior [kg/m ³], b) teor de humidade na camada de tijolo [kg/m ³]	63
Figura 53 – Boxplot dos resultados da simulação para uma parede simples com isolamento pelo interior (MRY e TRY): a) teor de humidade na camada de isolamento térmico [kg/m ³], b) teor de humidade na camada de gesso cartonado [kg/m ³]	64
Figura 54 – Boxplot do teor de humidade total [kg/m ²] de uma parede simples com isolamento pelo interior (MRY e TRY)	64
Figura 55 – Boxplot dos resultados da simulação para uma parede simples com isolamento pelo exterior (MRY e TRY): a) temperatura na superfície exterior [°C], b) humidade relativa na superfície exterior [%]	66

Figura 56 – Boxplot dos resultados da simulação para uma parede simples com isolamento pelo exterior (MRY e TRY): a) teor de humidade na camada de reboco exterior [kg/m ³], b) teor de humidade na camada de isolamento térmico [kg/m ³]	67
Figura 57 – Boxplot dos resultados da simulação para uma parede simples com isolamento pelo exterior (MRY e TRY): a) teor de humidade na camada de tijolo [kg/m ³], b) teor de humidade na de gesso cartonado [kg/m ³]	67
Figura 58 – Boxplot do teor de humidade total [kg/m ²] de uma parede simples com isolamento pelo exterior (MRY e TRY)	68
Figura 59 – Boxplot dos resultados da simulação para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (MRY e TRY): a) temperatura na superfície exterior [°C], b) humidade relativa na superfície exterior [%]	70
Figura 60 – Boxplot dos resultados da simulação para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (MRY e TRY): a) teor de humidade na camada de reboco exterior [kg/m ³], b) teor de humidade na camada de tijolo exterior [kg/m ³]	70
Figura 61 – Boxplot dos resultados da simulação para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (MRY e TRY): a) teor de humidade na caixa-de-ar [kg/m ³], b) teor de humidade na camada de isolamento térmico [kg/m ³]	71
Figura 62 – Boxplot dos resultados da simulação para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (MRY e TRY): a) teor de humidade na camada de tijolo interior [kg/m ³], b) teor de humidade na camada de gesso cartonado [kg/m ³]	71
Figura 63 – Boxplot do teor de humidade total [kg/m ²] de uma parede dupla com isolamento na caixa de ar (MRY e TRY)	72
Figura 64 – Zona de avaliação da parede simples com isolamento pelo interior	74
Figura 65 – Zona de avaliação da parede simples com isolamento pelo exterior	74
Figura 66 – Zona de avaliação da parede dupla com isolamento na caixa-de-ar	74
Figura 67 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede simples com isolamento pelo interior (MRY e do TRY): a) temperatura na superfície exterior [°C], b) humidade relativa na superfície exterior [%]	76
Figura 68 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede simples com isolamento pelo interior (MRY e do TRY): a) teor de humidade na camada de reboco exterior [kg/m ³], b) teor de humidade na camada tijolo [kg/m ³], c) teor de humidade na camada de isolamento térmico [kg/m ³], d) teor de humidade na camada de gesso cartonado [kg/m ³]	77
Figura 69 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede simples com isolamento pelo interior (MRY e do TRY): teor de humidade total [kg/m ²]	78
Figura 70 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede simples com isolamento pelo exterior (MRY e do TRY): a) temperatura na superfície exterior [°C], b) humidade relativa na superfície exterior [%]	79
Figura 71 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede simples com isolamento pelo exterior (MRY e do TRY): a) teor de humidade na camada de reboco exterior [kg/m ³], b) teor de humidade na camada de isolamento térmico [kg/m ³], c) teor de humidade na camada tijolo [kg/m ³], d) teor de humidade na camada de gesso cartonado [kg/m ³]	80

Figura 72 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede simples com isolamento pelo exterior (MRY e do TRY): teor de humidade total [kg/m ²]	81
Figura 73 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (MRY e do TRY): a) temperatura na superfície exterior [°C], b) humidade relativa na superfície exterior [%]	82
Figura 74 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (MRY e do TRY): a) teor de humidade na camada de reboco exterior [kg/m ³], b) teor de humidade na camada de tijolo exterior [kg/m ³], c) teor de humidade na caixa-de-ar [kg/m ³], d) teor de humidade na camada de isolamento térmico [kg/m ³]	83
Figura 75 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (MRY e do TRY): a) teor de humidade na camada tijolo interior [kg/m ³], b) teor de humidade na camada de gesso cartonado [kg/m ³], c) teor de humidade total [kg/m ²].....	84

ÍNDICE DE QUADROS (TABELAS)

Tabela 1 – Valores diários médios mensais do índice K_T para a cidade do Porto [63]	23
Tabela 2 – Medidas estatísticas referentes aos valores médios horários da temperatura [°C].....	28
Tabela 3 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da humidade relativa [-]	29
Tabela 4 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da radiação atmosférica [W/m ²]	30
Tabela 5 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da pressão atmosférica [hPa]	31
Tabela 6 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da radiação solar difusa [W/m ²]	32
Tabela 7 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da radiação solar global [W/m ²]	33
Tabela 8 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da precipitação [mm/h].....	34
Tabela 9 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da velocidade do vento [m/s]	35
Tabela 10 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da direção do vento [°]	36
Tabela 11 – Resultados do défice de saturação [Pa]	40
Tabela 12 – Valores do fator de exposição à chuva [45].....	43
Tabela 13 – Valores do fator de deposição da chuva [45].....	44
Tabela 14 – Resultados do Moisture Index [-]	45
Tabela 15 – Resultados do Climatic Index [-]	50
Tabela 16 – Resultados das várias metodologias	52
Tabela 17 – Propriedades da parede simples com isolamento pelo interior	60
Tabela 18 – Propriedades da parede simples com isolamento pelo exterior	61
Tabela 19 – Propriedades da parede dupla com isolamento na caixa-de-ar	61
Tabela 20 – Medidas estatísticas descritivas dos resultados das simulações para as diversas camadas de uma parede simples com isolamento pelo interior (MRY e TRY)	65
Tabela 21 – Medidas estatísticas descritivas dos resultados das simulações para as diversas camadas de uma parede simples com isolamento pelo exterior (MRY e TRY)	68
Tabela 22 – Medidas estatísticas descritivas dos resultados das simulações para as diversas camadas de uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (MRY e TRY)	72
Tabela 23 – Valores do RHTI para a série de anos mais crítica de acordo com os resultados dos vários métodos do MRYS	75
Tabela 24 – Teste estatístico de Mann-Whitney aplicado aos resultados da simulação do MRYS e do TRY para uma parede simples com isolamento pelo interior	78

Tabela 25 – Teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov aplicado aos resultados da simulação do MRY e do TRY para uma parede simples com isolamento pelo interior.....	78
Tabela 26 – Teste estatístico de Mann-Whitney aplicado aos resultados da simulação do MRY e do TRY, para uma parede simples com isolamento pelo exterior.....	81
Tabela 27 – Teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov aplicado aos resultados da simulação do MRY e do TRY, para uma parede simples com isolamento pelo exterior	81
Tabela 28 – Teste estatístico de Mann-Whitney dos resultados da simulação para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (MRY e do TRY).....	84
Tabela 29 – Teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov dos resultados da simulação para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (MRY e do TRY).....	85
Tabela 30 – Teste de hipóteses aplicado aos resultados da simulação do MRY e do TRY, para o teor de humidade total nas diferentes paredes	86

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

α – Albedo [-]

c_p – Calor específico do material seco [J/(kg.K)]

γ – Constante psicrométrica [kPa/°C]

δ – Declinação do sol [°]

ε – Porosidade [m³/m³]

ε' – Emissividade [-]

η – Número de horas solares por dia

θ – Ângulo entre a normal da parede e a direção do vento [°]

λ – Condutibilidade térmica do material seco [W/(m.K)]

λ' – Calor latente de vaporização [MJ/kg]

μ – Fator de resistência à difusão do vapor de água [-]

ρ – Massa volúmica [kg/m³]

\varnothing – Latitude do local [°]

ω – Teor de humidade [kg/m³]

Δ – Declive da curva de pressão do vapor de água [kPa/°C]

$\Delta_{\text{def.sat}}$ – Défice de saturação [Pa ou kPa]

Ω – Ângulo horário de pôr-do-sol [°]

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers

CI – Climatic Index

DI – Drying Index

DRY – Design Reference Year

EN – European Norm

EUA – Estados Unidos da América

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

HAM – Heat, Air and Moisture

IEA – International Energy Agency

INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

ISO – International Standards Organization

LFC – Laboratório de Física das Construções

MI – Moisture Index

MRY – Moisture Reference Year

RHTI – Relative Humidity and Temperature Index

SNL - Sandia National Laboratory

SRY – Short Reference Year

TMY – Typical Meteorological Year

TRY – Test Reference Year

WDR – Wind Driven Rain Load

WI – Wetting Index

WYEC – Weather Year for Energy Calculations

a_u e b_u – Coeficiente em função do vento [-]

D_h – Radiação solar difusa numa superfície horizontal [W/m^2]

e – Espessura [m]

E_{pen} – Potencial de evaporação ou evapotranspiração [mm/h]

F_D – Fator de deposição da chuva [-]

F_E – Fator de exposição à chuva [-]

F_L – Constante empírica [(kg.s)/(m³.mm)]

G_h – Radiação solar global numa superfície horizontal [W/m^2]

HR – Humidade relativa [- ou %]

K_T – Índice de claridade diário médio mensal [-]

P – Pressão de vapor do ar [Pa ou kPa]

P_{sat} – Pressão de saturação do ar [Pa ou kPa]

r_h – Intensidade de precipitação, numa superfície horizontal [mm/h]

R_{atm} – Radiação atmosférica [MJ/(m².h)]

R_n – Balanço radiativo [MJ/(m².h)]

R_{nL} – Balanço radiativo de onda longa emitida [MJ/(m².h)]

R_{nS} – Balanço radiativo de onda curta absorvida [MJ/(m².h)]

R_s – Radiação solar global [MJ/(m².h)]

RH_x – Humidade relativa limite [%]

T – Temperatura [°C]

T_x – Temperatura limite [°C]

U_z – Velocidade média horária do vento, a Z metros de altura [m/s]

WDR – Chuva incidente acumulada, numa parede vertical [mm/h]

Z – Altura [m]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O interesse crescente por temas relacionados com aspetos demográficos, socioeconómicos e culturais, que influenciam o desenvolvimento das cidades faz com que a climatologia seja, cada vez mais, uma prioridade e um tema de investigação em diferentes áreas científicas nomeadamente a Geografia, Arquitetura, Engenharia e a Meteorologia [1].

No que diz respeito à engenharia, o zonamento climático é de grande relevância uma vez que traz grandes implicações na construção, nomeadamente em relação às soluções de construção mais viáveis, tendo em conta a sua influência na durabilidade dos materiais, qualidade do ar interior, segurança e saúde dos habitantes assim como, a eficiência energética do sistema e o impacto económico que daí advém [2].

Para que os edifícios apresentem um comportamento satisfatório a nível higrotérmico é necessário a existência de dados climáticos exteriores fiáveis e referentes à localização de interesse. É ainda fundamental o seu adequado tratamento e análise, para que os resultados sejam os mais aproximados possíveis da realidade.

Tal como se afirma em Karagiozis e Salonvaara [2], a quantificação da transferência de calor e humidade através da envolvente dos edifícios e no seu interior, a partir de ensaios em laboratório ou *in-situ*, é um processo complexo e dispendioso, pelo que o uso de programas de simulação numérica surge como uma alternativa mais viável. Estes programas são eficazes na extrapolação e interpretação dos resultados experimentais e importantes na otimização do desempenho higrotérmico dos edifícios.

Para o efeito, é necessária a criação de anos climáticos de referência que traduzam as condições climatéricas exteriores do local que se pretende estudar. No decorrer do presente trabalho, será criado um ano climático de referência, que diz respeito aos riscos de acumulação de humidade, denominado por *Moisture Reference Year*, denotando-se a existência de diversos tipos de anos climáticos, cada um com uma metodologia de construção e finalidade, distintas.

Assim, serão utilizados os dados da estação meteorológica do Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LFC/FEUP), para a caracterização do clima da cidade do Porto.

1.2. OBJETIVOS

A ausência de dados climáticos fiáveis, assim como a falta de concordância em relação à melhor metodologia para determinação dos anos climáticos de referência e posterior escolha dos mesmos, para uso nas simulações higrotérmicas, tornou necessária a elaboração do estudo desenvolvido no presente trabalho.

Neste sentido, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar e classificar o clima de Portugal continental e do Porto, segundo os sistemas de classificação climática que mais se enquadram no âmbito deste trabalho;
- Evidenciar as diferenças entre os anos climáticos de referência para cálculos energéticos e os anos climáticos de referência para avaliação do desempenho higrotérmico;
- Investigar e descrever as diversas metodologias existentes para a determinação do *Moisture Reference Year*;
- Compreender as diferenças entre as metodologias utilizadas na determinação do *Moisture Reference Year* e do *Test Reference Year*;
- Tratar e colmatar as falhas existentes na série de dados fornecida pela estação meteorológica do LFC/FEUP;
- Caracterizar, de forma estatística, as tendências dos parâmetros meteorológicos ao longo da série de anos analisada;
- Calcular a percentagem de falhas existente em cada ano e para cada parâmetro;
- Determinar os anos candidatos a *MRY*, para a cidade do Porto, através de três metodologias com níveis de complexidade distintos;
- Avaliar a relação entre as diferentes metodologias para a determinação do *MRY*;
- Identificar o ano mais crítico, em relação aos riscos de acumulação de humidade (*MRY*), para a cidade do Porto;
- Simular e avaliar o desempenho higrotérmico de três tipologias de parede, fazendo variar o ano climático de referência;
- Comparar e analisar as diferenças entre os resultados das simulações higrotérmicas;

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos, incluindo este capítulo de Introdução, onde é exposto o enquadramento do tema, assim como os objetivos e o âmbito em que se insere, e a organização e estrutura adotada na sua elaboração.

Inicia-se o capítulo 2, Dados Climáticos para a Simulação Higrotérmica, com um breve enquadramento acerca do clima e a sua importância na avaliação higrotérmica dos edifícios. Além disso, são apresentados dois sistemas de classificação climática para a descrição e classificação do clima de Portugal continental e da cidade do Porto.

No capítulo 3, Tratamento e Análise dos Dados Climáticos, são descritos os métodos abordados para a colmatação das falhas existentes nos dados fornecidos pela estação meteorológica do LFC/FEUP, assim como a percentagem de falhas colmatadas. Neste capítulo, foi também feita uma análise descritiva dos mesmos, através da apresentação de algumas medidas estatísticas.

O capítulo 4, Construção do *Moisture Reference Year*, apresenta as metodologias utilizadas na determinação do ano climático de referência, bem como os resultados e a seleção dos anos candidatos a

MRY. Inclui também uma analogia sobre os resultados obtidos nas diversas metodologias, assim como a identificação do *MRY*, para a cidade do Porto.

No capítulo 5, *Análise da Simulação Higrotérmica*, são expostos os resultados das simulações, para algumas tipologias de parede, e comparados os resultados entre a utilização do *MRY* e do *TRY*, da cidade do Porto, através de uma análise estatística.

No capítulo 6, *Conclusão*, são apresentadas as considerações finais do trabalho, seguindo-se algumas reflexões sobre os resultados obtidos e a principais dificuldades encontradas na realização do mesmo. Por fim, são sugeridos possíveis desenvolvimentos futuros que podem ser considerados como um complemento e/ou continuação deste estudo.

2

DADOS CLIMÁTICOS PARA A SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA

2.1. O CLIMA E A SUA IMPORTÂNCIA

2.1.1. CLIMA E TEMPO METEOROLÓGICO

É de notória importância o conhecimento do clima uma vez que a avaliação da resposta higrotérmica dos edifícios, face às solicitações climáticas, permite seleccionar as soluções técnicas que garantem um nível de desempenho higrotérmico adequado.

De acordo com o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) [3], o clima apresenta diferentes características consoante a sua localização geográfica. Diferentes fatores como latitude, longitude, altitude, proximidade do mar e vegetação, que são responsáveis por essa variação, fazem com que existam climas específicos em diferentes regiões.

Frequentemente confundidos, os conceitos de clima e tempo meteorológico são descritos pelos mesmos parâmetros, mas segundo escalas de tempo distintas. Assim sendo, o tempo meteorológico de um dado local, num determinado instante, é definido por um conjunto de elementos atmosféricos tais como: temperatura do ar, humidade relativa, precipitação, vento, pressão atmosférica, nebulosidade, humidade relativa do ar, etc. Estes parâmetros sofrem alterações devidas às atividades desempenhadas pelo homem. Por outro lado, o clima é uma síntese dos estados do tempo meteorológico característicos de um dado local ou região num determinado intervalo de tempo definido. Para definir o clima recorre-se à estatística e utilizam-se valores médios, valores extremos, probabilidades de ocorrência ou de excedência, entre outros. É importante referir que é necessário dispor de longas séries de dados para serem perceptíveis as tendências climáticas [4].

Assim, e uma vez que os padrões climáticos dependem de inúmeros parâmetros que os influenciam, não existem regiões no planeta cujos climas sejam absolutamente idênticos, no entanto, existem zonas cujas condições climatéricas são muito semelhantes [5].

Tal como referido por Khlebnikova [5], o significado prático e científico das classificações climáticas das diversas regiões do planeta está tanto na compreensão dos mecanismos físicos que afetam e contribuem para as alterações climáticas existentes, assim como na avaliação das suas potencialidades e aspetos da sua utilização em diversas áreas científicas. Para melhor compreender estas variações climáticas têm sido realizados, ao longo do último século, vários estudos por diferentes autores para atribuir uma classificação climática às diferentes regiões do planeta.

A maior parte destas classificações são baseadas em macroclimas, isto é, climas baseados em largas escalas (zonas com extensões superiores a 2000 km, até partes de continentes). É de notar que são utilizadas outras escalas nos processos de classificação climática, dando origem aos denominados mesoclimas (abrangendo regiões com dimensões entre os 2 km até 2000 km), topoclimas (que compreende locais cujas dimensões podem variar entre 100 m até alguns quilómetros) e os microclimas (correspondendo ao comportamento dos elementos climáticos em áreas cujas dimensões variam entre 1 a 100 metros, podendo corresponder ao microclima de uma rua, edifício ou mesmo da divisão de uma casa) [1, 6].

Deste modo, e de acordo com Khlebnikova [5] surgiram diversos sistemas de classificação climática, entre os quais:

- Classificação climática de Koppen-Geiger;
- Classificação climática de Thornthwaite;
- Classificação climática baseada no conceito das massas de ar (entre as quais se destacam a de Alisov e de Strahler);
- Classificação climática baseada nas características da quantidade de energia à superfície;
- Classificação agroclimática;
- Classificação bioclimática;
- Classificação energético-climática;
- Classificação climática para especificidades técnicas.

Sendo a classificação de Koppen-Geiger a mais conhecida, e frequentemente utilizada, e a de Thornthwaite aquela que mais se relaciona com o trabalho desenvolvido, uma vez que tem em consideração parâmetros como a evapotranspiração, o défice de hídrico e o excedente hídrico, tendo por base fatores como a humidade, a temperatura e a precipitação, foram utilizadas ambas as classificações para descrever o clima de Portugal continental e do Porto.

Quanto à sua localização, a cidade do Porto, está situada a noroeste do país, possuindo uma área de cerca de 41 km² e encontrando-se entre os paralelos 41°8' N e 41°11' N e entre os meridianos 8°33' O e 8°41' O. É limitada a sul pelo rio Douro, a oeste pelo oceano Atlântico e a este e norte faz fronteira com os concelhos de Gondomar, Maia e Matosinhos. Quanto à altitude, varia entre os 0 e os 160 m, estando a freguesia de Paranhos localizada à maior cota (Figura 1) [7].

De acordo com Góis [6], a localização geográfica e a proximidade do mar influenciam o clima do Porto, tornando-o um clima temperado. Por outro lado, o relevo do Porto favorece a subida das massas de ar oriundas do oceano Atlântico, que arrefecem em altitude e condensam. Mesmo nas áreas de baixa altitude pode ocorrer a subida das massas de ar em consequência das turbulências provocadas pela rugosidade da superfície terrestre.

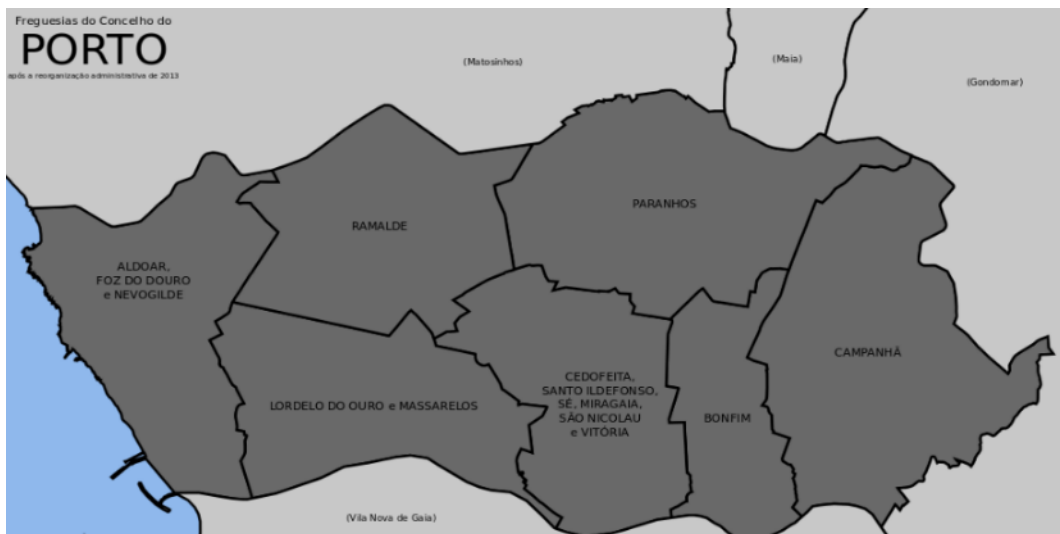


Figura 1 – Localização geográfica da cidade do Porto [8]

2.1.2. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA SEGUNDO KOPPEN-GEIGER

Proposta em 1900 pelo climatologista russo Wladimir Peter Koppen, e tendo sido por ele aperfeiçoada e desenvolvida em colaboração com Rudolf Geiger, a classificação de Koppen-Geiger é baseada na Fitossociologia e na Ecologia, sendo também considerada a sazonalidade de fatores como a temperatura média mensal do ar e a precipitação total mensal [9-11]. Assim sendo, Koppen dividiu os hemisférios em 5 grandes zonas climáticas:

- A – Clima tropical;
- B – Clima seco;
- C – Clima temperado;
- D – Clima temperado frio;
- E – Clima polar.

Este zoneamento é definido através do critério da temperatura sendo que a letra A corresponde às zonas mais quentes e a letra E às mais frias. Para designação dos climas, Koppen atribui três letras, sendo que a primeira é definida de acordo com o anteriormente referido, a segunda é definida através das particularidades do regime pluviométrico e a terceira através das particularidades térmicas do local (Figura 2).

Posteriormente surgiram novas versões que vieram colmatar algumas falhas do sistema Koppen-Geiger, entre os quais o sistema de classificação climática de Trewartha, que veio reclassificar os climas das latitudes médias aproximando-os mais das condições reais existentes no meio ambiente [12].

De acordo com o IPMA [3], Portugal continental é classificado na sua maior parte do território por zonas temperadas de inverno chuvoso e verão seco e quente (*Csa*). As restantes zonas são classificadas como zonas temperadas de inverno chuvoso e verão seco e ameno (*Csb*). Uma pequena área do distrito de Beja tem uma classificação do tipo *Bsk* que se refere a climas secos, de estepe fria de média latitude, como demonstra a Figura 3. Assim, e de acordo com a classificação de Koppen-Geiger, a cidade do Porto está classificada como *Csb*, isto é, clima temperado húmido com inverno chuvoso e verão seco e ameno.

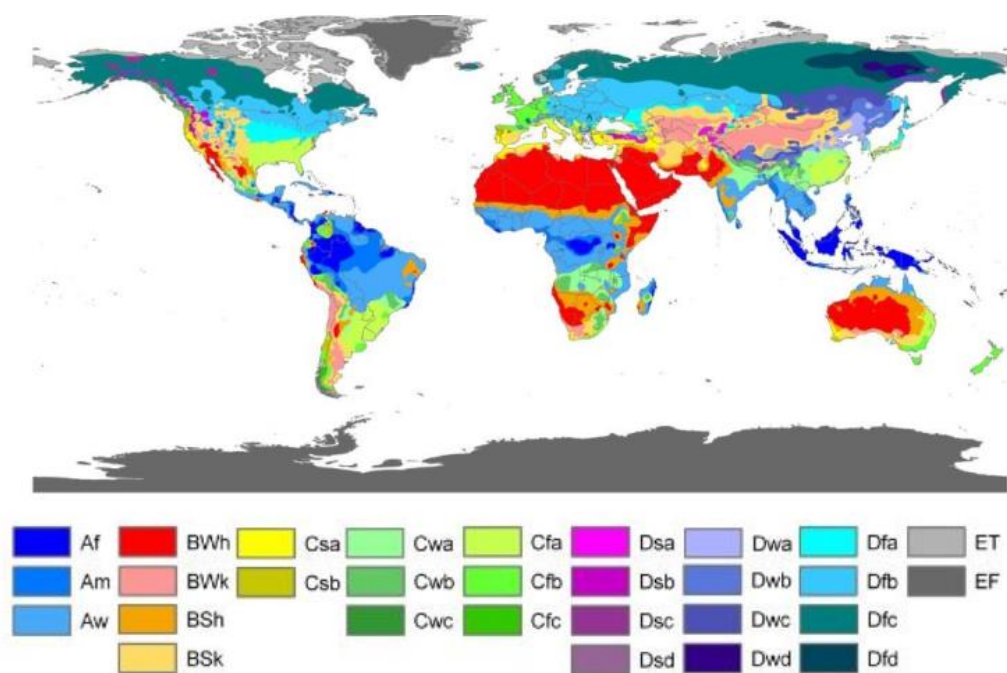


Figura 2 – Classificação climática de Koppen-Geiger [12]

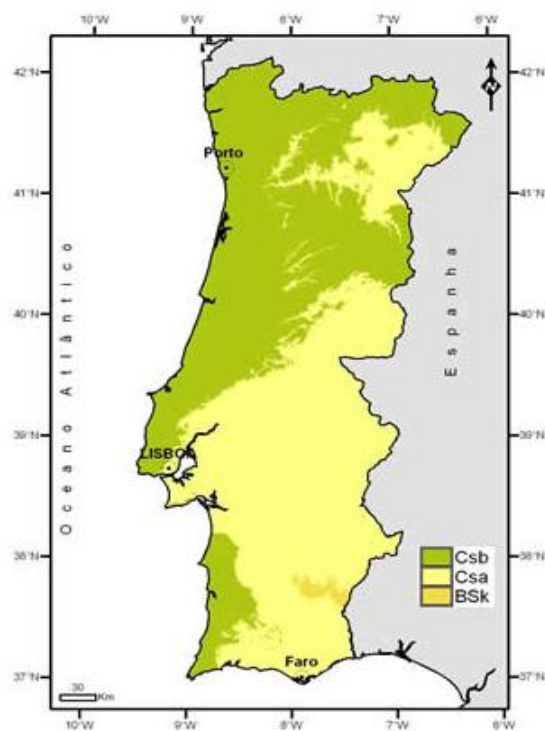


Figura 3 – Classificação climática de Koppen-Geiger para Portugal Continental [3]

Através desta classificação, foi possível identificar climas distintos com base na estatística de dados meteorológicos, dando especial atenção à temperatura e à precipitação e relacioná-la com a distribuição dos diferentes tipos de vegetação existentes em todo o mundo, tendo em conta a sazonalidade dos mesmos [13].

2.1.3. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA SEGUNDO THORNTWHAITE

A classificação climática de Thornthwaite foi proposta inicialmente em 1931 pelo geógrafo e climatologista Charles Warren Thornthwaite e baseava-se nos mesmos princípios da classificação de Köppen-Geiger. Foi modificada em 1948 relacionando parâmetros como o *Moisture Index* e o *Thermal Efficiency Index*, uma vez que Thornthwaite achava que a precipitação e a temperatura, por si só, não eram suficientes para descrever as condições climáticas de um local [13].

Os climas são divididos em cinco grandes grupos, tendo em conta os valores do *Moisture Index*, que variam com incrementos de 20, correspondendo os valores mais elevados (≥ 100) a climas permanentemente húmidos e os valores entre os -60 e -40 a climas áridos (Figura 4) [5]. A classificação climática de Thornthwaite segundo o *Moisture Index* é:

- Perma-húmido – A;
- Húmido – B₄ a B₁;
- Sub-húmido – C₂ a C₁;
- Semiárido – D;
- Árido – E.

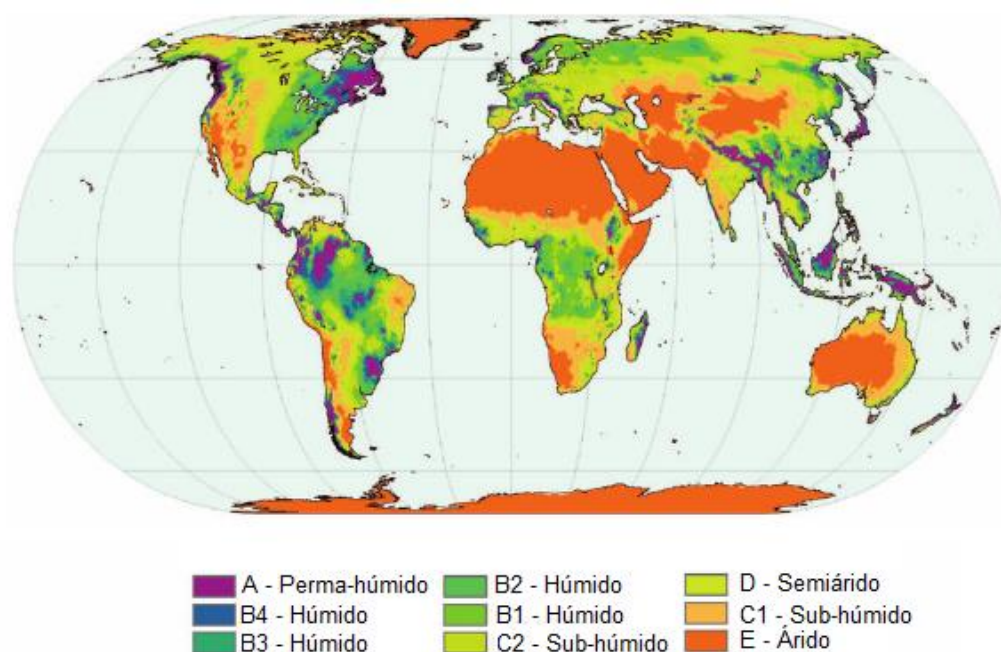


Figura 4 – Classificação climática de Thornthwaite de 1948, *Moisture Index* [13]

Outro dos parâmetros utilizados por Thornthwaite foi o *Thermal Efficiency Index*, baseado no potencial de evapotranspiração como um fator de classificação. Desta forma, surgiu uma subclassificação dos climas:

- Megatérmico – A’;
- Mesotérmico – B’₄ a B’₁;
- Microtérmico – C’₂ a C’₁;
- Tundra – D’;
- Gelado – E’.

Valores superiores a 114 correspondem à classificação A’ enquanto no outro extremo, valores inferiores a 14,4, correspondem à classificação E’. Os intervalos da classificação são efetuados através de incrementos de 14,2 (Figura 5).

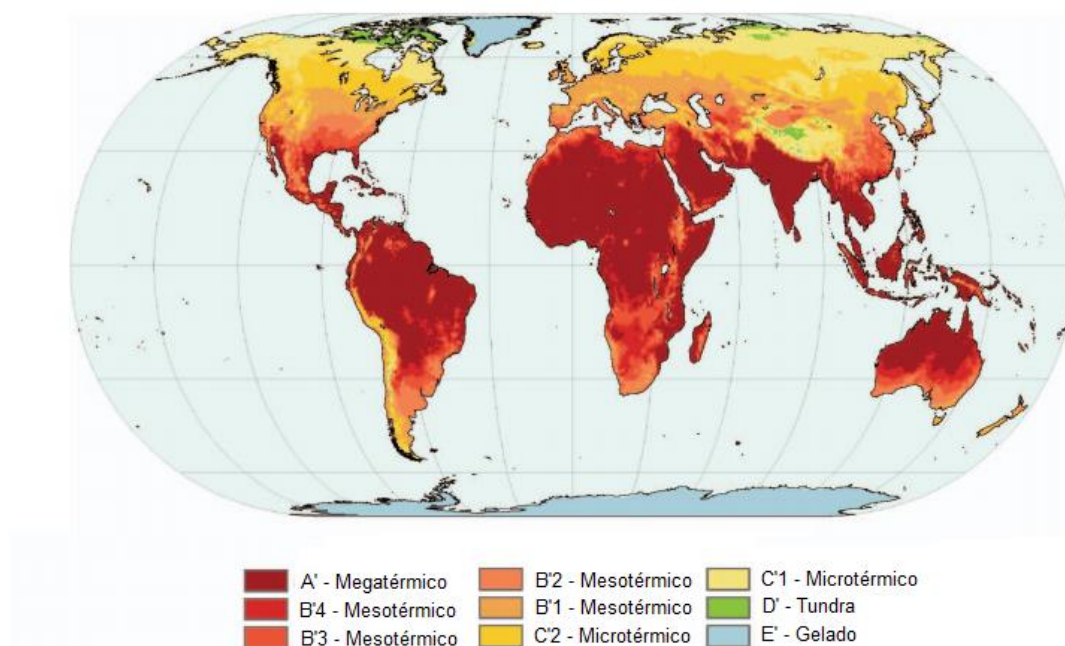


Figura 5 – Classificação climática de Thornthwaite de 1948, *Thermal Efficiency Index* [13]

Segundo Morais [14], Portugal apresenta alguma variabilidade climática, existindo desde zonas com classificações A, o que significa que são climas com um *Moisture Index* elevado, isto é, perma-húmido, até zonas com classificação D, ou seja, climas semiáridos. Quanto ao *Thermal Efficiency Index*, baseado no potencial de evapotranspiração, existem em Portugal zonas com índices que variam entre as classificações B’₁ e B’₃, que correspondem a climas mesotérmicos (Figura 6).

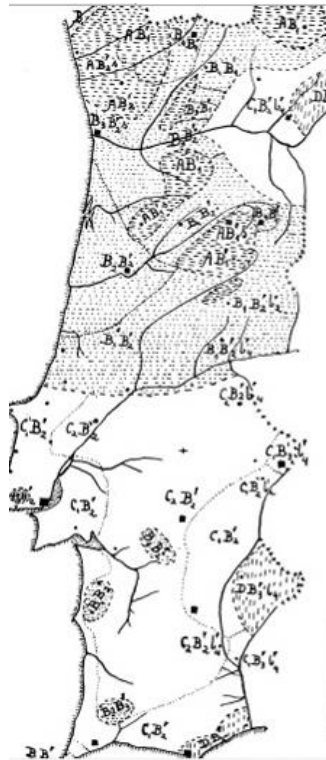


Figura 6 – Classificação climática de Thornthwaite de 1948, para Portugal continental [14]

Mais tarde, com o desenvolvimento e aperfeiçoamento desta metodologia, surgiram novas versões que relacionam os vários fatores inicialmente definidos por Thornthwaite, dando origem a uma nova e mais complexa classificação climática de Thornthwaite [13].

Quanto ao clima do Porto, este é definido como sendo um clima pertencente à categoria B₃ e B₂', ou seja, clima mesotérmico húmido [14].

No que diz respeito às vantagens da utilização da classificação climatérica de Thornthwaite, esta torna possível distinguir climas com base em fatores como a temperatura e humidade existentes numa determinada região e relacioná-los com a sazonalidade e gradientes de variação que nela existem. Por outras palavras é possível diferenciar com clareza climas húmidos de climas secos através da análise do *Moisture Index*, o que não era muito evidente na classificação de Koppen-Geiger. Por outro lado, o *Thermal Efficiency Index* veio classificar os climas de uma forma mais precisa e aproximada das condições reais existentes no meio ambiente, do que simplesmente a utilização do parâmetro da temperatura com a mesma finalidade, utilizada na classificação de Koppen-Geiger. Outra das vantagens desta metodologia é o facto de esta poder ser interpretada através de índices com valores numéricos intuitivos, sendo que a sua classificação é baseada em intervalos sistemáticos, tornando a perceção desta classificação mais evidente. Tal como Koppen, Thornthwaite incorporou o parâmetro da sazonalidade neste método, o que o torna mais complexo já que é necessário definir a sazonalidade de dois fatores distintos, temperatura e humidade, sendo esta uma desvantagem tendo em conta as dificuldades da determinação da mesma. Do mesmo modo, obstáculos como a complexidade do cálculo do potencial de evapotranspiração, especialmente antes do desenvolvimento de recursos computacionais tornou este, um método menos adotado [13].

2.2. ANOS CLIMÁTICOS DE REFERÊNCIA

2.2.1 DEFINIÇÃO DE ANOS CLIMÁTICOS DE REFERÊNCIA

Refere-se em Zhou *et al.* [15] que é essencial para os projetistas e construtores compreenderem as condições climáticas exteriores para avaliarem e dimensionarem corretamente a envolvente exterior de um edifício. O bom desempenho higrotérmico de um edifício é crucial, uma vez que os danos causados pela humidade constituem uma das principais causas de deterioração do mesmo. A acumulação excessiva da mesma pode provocar danos estruturais, degradação da resistência térmica dos materiais de construção, desenvolvimento de bolores e diminuição da qualidade do ar interior. Um controlo eficaz da humidade assegura uma maior durabilidade dos materiais e consequente aumento do tempo de vida útil do edifício. Métodos tradicionais de determinação dos riscos de condensação em elementos construtivos, como o de Glaser, não preveem a sua resposta higrotérmica a longo prazo, especialmente porque não têm em consideração a água da chuva que é absorvida.

Deste modo, de acordo com Delgado *et al.* [16], os modelos numéricos de simulação higrotérmica que avaliam a acumulação e o transporte de humidade e calor através de um elemento construtivo, considerando a variação das condições climáticas exteriores e interiores, têm a capacidade de fornecer informações sobre o desempenho, a longo prazo, da envolvente de um edifício, assim como de prever o risco de deterioração proveniente do excesso de humidade. Estes modelos numéricos de simulação higrotérmica exigem a recolha e seleção de dados climáticos que representem as condições meteorológicas do local que se pretende avaliar, incluindo a precipitação, a temperatura do ar, a humidade relativa, a radiação solar, a velocidade e direção do vento.

Segundo Kalamees e Vinha [17], os dados climáticos devem refletir a variabilidade climática a que a envolvente do edifício está sujeita, sob o intuito de fornecer um nível adequado de segurança, em relação aos problemas de humidade. Uma abordagem comum consiste em determinar um ano de referência a partir de longas séries de dados climáticos disponíveis.

2.2.2 ANOS CLIMÁTICOS DE REFERÊNCIA PARA CÁLCULOS ENERGÉTICOS

De acordo com Festa e Ratto [18], um ano climático de referência é definido por um conjunto de dados meteorológicos horários de qualidade, obtidos a partir de uma amostra de pelo menos 10 anos, sendo constituído por 8760 horas e que traduz a ocorrência e persistência de determinadas condições meteorológicas de um dado local, ao longo dos vários meses do ano.

Segundo Kalamees e Kurnitski [19], um ano de referência pode ser definido para cálculos energéticos, sendo baseado em modelos estatísticos de acordo com os valores horários das variáveis meteorológicas, de modo a que os valores médios a longo prazo representem o clima da forma mais aproximada possível das condições reais existentes.

De acordo com Pinheiro [20], com o intuito de simplificar e ajustar toda essa informação disponível, surgiram vários métodos de tratamento de dados climáticos para a criação de anos climáticos de referência para cálculos energéticos, sendo os mais utilizados:

- Método Dinamarquês de Lund *et al.* [21-23];
- Método de Dogniaux e Sneyers [24];
- Método desenvolvido nos Estados Unidos da América pelo *Sandia National Laboratory (SNL)* [25];
- Método de Festa e Ratto (adaptado do método desenvolvido pelo *SNL*) [18].

Assim, surgiram diversos anos climáticos de referência entre os quais o *Test Reference Year (TRY)*, o *Typical Meteorological Year (TMY)*, o *Weather Year for Energy Calculations (WYEC)*, o *Design reference year (DRY)*, o *Short Reference Year (SRY)*, entre outros. De todos eles o *TRY* é o mais divulgado e utilizado em programas de simulação, para cálculo energético dos edifícios.

De acordo com Lund [26], o *Test Reference Year* tem sido produzido segundo diferentes metodologias, surgindo diversas designações, nomeadamente nos Estados Unidos da América a denominação mais comum é *Typical Meteorological Year (TMY)*. Na Europa, é designado por *Test Reference Year (TRY)*, sendo um dos métodos mais utilizados por diversos países pertencentes à Comunidade Europeia para caracterizar os climas dos locais. Por outro lado, na Alemanha utiliza-se um método próprio, criado em conjunto pela Universidade de Berlim e pelo Instituto de Meteorologia da Alemanha, em Offenbach.

Segundo Al-Mofeez *et al.* [27], o *TRY* dos EUA é considerado um dos primeiros conjuntos de dados climáticos elaborado especificamente para simulações energéticas em edifícios.

Conforme referido por Kalamees e Kurnitski [19], o *TRY* é obtido através da eliminação dos anos com temperaturas extremamente elevadas ou extremamente baixas, até que um ano médio seja encontrado, de acordo com a metodologia descrita pela *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)* [28].

Segundo Crawley [29], o *TRY* utilizado na maior parte dos países da União Europeia utiliza o método descrito na norma europeia *EN ISO 15927-4* [30], que se baseia na estatística de Finkelstein–Schafer (FS) para definir os melhores meses da série de dados, que serão incluídos no ano de referência [31].

De acordo com Kalogirou [32], o processo de criação do *TRY* consiste em selecionar, para cada mês do calendário do ano típico, e a partir das médias diárias da temperatura, humidade relativa, velocidade do vento e radiação global, os cinco meses candidatos, de acordo com a sua proximidade aos dados de longo prazo. Tal é conseguido através da avaliação da estatística de Finkelstein–Schafer, em que as funções das frequências acumuladas de cada mês são comparadas com as da série total. No final, é selecionado o mês com menor valor de FS e menor desvio em relação à série total de dados.

Em suma, Rahman e Dewsbury [33] afirmam que este processo é confiável, uma vez que a estatística de FS mede a similaridade entre duas distribuições e quando estas são idênticas o seu valor tende para zero, tornando-se fiável a escolha do mês mais próximo da média a longo prazo.

2.2.3. MOISTURE REFERENCE YEAR (MRY)

Conforme referido por Zhou *et al.* [15], em comparação com os anos de referência para cálculos energéticos, que se definem essencialmente pela média dos valores dos parâmetros climáticos para os locais considerados, um *MRY* deve representar um clima que permita uma correta avaliação da degradação causada pela humidade na envolvente do edifício. De um modo geral, estes problemas de humidade resultam do comportamento do edifício considerando o seu potencial de humidificação e de secagem, aliado à variação extrema das condições climáticas.

De acordo com Cornick *et al.* [34], existem duas metodologias principais para a determinação e criação de um *MRY*:

- O método dependente do tipo de construção, que tem por base simulações higrotérmicas (utilizado em estudos mais detalhados, tendo em conta as especificidades do clima e do tipo de construção);

- O método baseado apenas na análise de dados meteorológicos, isto é, independente da construção (vantajoso para estudos que compreendam diversos climas e em que se pretenda avaliar o impacto destes em elementos construtivos).

Quanto aos métodos dependentes do tipo de construção, selecionam o *MRY* com base na resposta higrotérmica do edifício, submetido a diferentes anos climáticos, utilizando modelos *HAM* (*Heat, Air and Moisture models*). Alguns exemplos de métodos dependentes do tipo de construção, para determinação do *MRY*, podem ser encontrados em Sanders [35], Geving [36] e Rode [37]. Para a sua construção definem-se um conjunto de paredes tipo, as condições interiores desejadas e a orientação mais crítica. Posteriormente, efetua-se a simulação e por fim avalia-se o comportamento higrotérmico das paredes através dos dados climáticos horários disponíveis para os vários anos. Assim, o *MRY* é definido como o ano em que ocorre o máximo de humidade diária total na parede ou o ano que apresenta a humidade média anual máxima.

Uma outra metodologia baseada, num fator *II*, que representa o potencial de secagem, foi proposta por Hagentoft e Harderup [38]. Neste caso, é necessário ter em conta a humidade da superfície exterior da parede, a radiação solar, atmosférica e terrestre, a orientação do elemento construtivo e o coeficiente de transmissão térmica do elemento construtivo em análise. Além disso, é necessário definir um ano de referência para cada orientação do edifício assim como as suas características, nas diferentes orientações. Este é um método mais exato que requer a introdução de muitas variáveis iniciais e com uma interpretação dos resultados mais complexa.

Em relação aos métodos independentes do tipo de construção, surgiram inicialmente no Anexo 24 da *International Energy Agency* (IEA), sendo baseados em quatro pressupostos diferentes:

- 10% dos anos quentes e frios (*10% Hot and Cold Years*) – Neste método, os anos são classificados como frios, quentes ou médios através do desvio padrão em relação à temperatura média anual, sendo que o ano frio é definido pelo ano mais próximo da média menos 1,28 vezes o desvio padrão, o ano quente definido pelo ano mais próximo da média mais 1,28 o desvio padrão e o ano médio obtido pelo ano com a média da temperatura mais próxima da média dos anos a avaliar;
- Potencial de secagem (*Drying Index*) – Nesta metodologia, o potencial de secagem é calculado através do fator *II*, adaptado para ser independente do tipo de construção. Assim, o ano com o menor valor de *II* é considerado o ano mais húmido, correspondendo ao *MRY*. Por outro lado, o ano cujo valor de *II* é o maior, define-se como o ano seco. Um ano médio é também definido pelo ano cujo valor de *II* se aproxima mais da média dos valores de *II* para os anos climáticos considerados;
- Potencial de humificação (*Wetting Index*) – Neste caso, o *MRY* pode ser definido pela precipitação média anual ou pelo *Wind Driven Rain Load* (*WDR*), numa parede de fachada, sendo que a utilização do primeiro parâmetro está a cair em desuso. Assim, e de acordo com a primeira hipótese, o *MRY* é definido pelo ano que apresenta o maior valor de precipitação, sendo que no segundo caso o *MRY* é selecionado da mesma forma, mas tendo por base o cálculo da chuva incidente, sendo necessário definir alguns parâmetros tais como a precipitação e a sua relação com a velocidade e direção do vento. Existem diferentes metodologias para determinação deste índice, entre as quais: o Método de Lacy [39, 40], a *EN ISO 15927-3* [30], o Método de Kunzel [41], o Método de Straube [42], o Método de Choi [43, 44], a *ASHRAE Standard 160* [45], entre outros. Todos esses métodos têm bases semelhantes.
- Método combinado (*Combined Method*) – Contrariamente aos métodos anteriormente referidos, este relaciona o potencial de humificação com o potencial de secagem, dividindo o primeiro

pelo segundo. Ou seja, quanto maior o valor do quociente entre os dois parâmetros, mais húmido será o ano, sendo o *MRY* correspondente ao ano com o maior valor.

Outras metodologias foram também propostas, sendo que Sanders [46] e Ali Mohamed e Hens [47] sugeriram que o *MRY* devia estar relacionado com a temperatura média anual do local em estudo. Por outro lado, Geving [36] sugeriu que o *MRY* devia ser definido através da humidade relativa média anual.

Kalamees e Vinha [17] utilizaram um método que define o *MRY* para avaliar a ocorrência de condensações e o desenvolvimento de bolores. No primeiro caso, o *MRY* é selecionado de acordo com o potencial de secagem, denominado por défice de saturação. É obtido através do cálculo da média dos valores das diferenças horárias entre a humidade absoluta de saturação do ar exterior, função da temperatura, e a humidade absoluta efetiva presente no ar exterior, ao longo dum período de tempo. Uma vez que o défice de saturação descreve o potencial de secagem de um elemento construtivo, quanto maior o défice maior o potencial de secagem. Deste modo, o ano correspondente ao *MRY* será o ano com o menor défice de saturação ou menor potencial de secagem. A vantagem deste método em relação ao método baseado no fator *II* é que este é mais simples de determinar e exige menos dados iniciais, não dependendo do tipo de construção.

A determinação do *MRY* para análise do desenvolvimento de bolor baseia-se no *Mold Index* [48]. A determinação deste índice é um pouco mais complexa do que a anterior, uma vez que o crescimento de bolores depende de várias variáveis como a temperatura, humidade relativa, teor de humidade do material e do tipo de substrato. Há risco de desenvolvimento de bolores sempre que a humidade relativa se mantenha acima dos 80% e que as temperaturas estejam compreendidas entre 5 e 50°C. Assim, o *MRY* corresponde ao ano com o maior valor do *Mold Index*.

Por sua vez, é referido em Cornick *et al.* [34] um método baseado no *Moisture Index*, que, à semelhança do método combinado, compreende tanto o potencial de secagem como o potencial de humidificação. Desta forma, é necessário definir ambos os parâmetros sendo o potencial de humidificação ou *Wetting Index* (*WI*) obtido de uma forma simplificada, pela precipitação média anual ou pelo índice *WDR*. Por outro lado, o potencial de secagem ou *Drying Index* (*DI*), que está relacionado com a evaporação, é definido pela soma das diferenças horárias entre a humidade absoluta de saturação e a humidade absoluta do ar, à semelhança do método de Kalamees e Vinha [17], baseado no défice de saturação. Posteriormente é feita uma normalização de ambos os índices, uma vez que esses possuem unidades diferentes. Após a sua normalização, é calculado o *Moisture Index* e selecionado o *MRY* mais gravoso de acordo com o maior valor do *MI*.

Existem algumas desvantagens na utilização deste método sendo que uma delas é a diferença entre a evaporação e o potencial de evaporação. A evaporação é a quantidade de água que é realmente removida de uma superfície, enquanto o potencial de evaporação é independente do tipo de construção, dependendo apenas das condições climáticas. Outra das desvantagens deste método é que fatores como a radiação solar não são tidos em consideração. Quanto à sua classificação, os *MRY's* podem ser definidos como húmidos, secos ou médios. Em relação aos anos húmidos e secos, são definidos pelos anos que se desviam mais do que um desvio padrão, em relação à média dos valores do *Moisture Index*, enquanto os anos médios se situam dentro do intervalo de um desvio padrão.

De acordo com a análise feita por Djebbar *et al.* [49], embora exista uma quantidade vasta de informação relacionada com a construção do *Moisture Reference Year*, não há consenso universal no que toca à melhor metodologia para construção ou seleção do *MRY*. Apenas existe concordância nos seguintes critérios:

- O *MRY* deve refletir a variabilidade climática do local;

- Deve resumir as condições climáticas extremas da localização geográfica em análise;
- No que se refere à avaliação higrotérmica e de durabilidade, o *MRY* deve conter informação referente a um ano, no mínimo;
- O *MRY* deve ter em conta a carga crítica de humidade nas componentes do edifício para que sejam satisfeitos os níveis de segurança em relação à degradação pela humidade;
- Deve ser baseado na localização e independente do tipo de construção;
- Deve ser selecionado com base no critério dos 10%, justificável pela escolha dum período de retorno de 10 anos, permitindo que a humidade acumulada durante um ano mau seque nos anos seguintes, prevenindo assim a deterioração a longo prazo dos elementos construtivos, ou como sendo o ano mais crítico em termos de humidade.

Cornick *et al.* [34] comparou alguns dos métodos de determinação do *MRY* independentes do tipo de construção com o método baseado no *Moisture Index* e verificou que são coerentes em termos de resultados, uma vez que ambos têm como base a precipitação. Por outro lado, quando era utilizada a temperatura média anual como base para selecionar o *MRY*, verificou que existiam grandes discrepâncias entre os resultados, uma vez que não havia uma correlação forte entre a precipitação e a temperatura média anual. Do mesmo modo, não existia uma correlação forte entre o potencial de secagem e os métodos baseados na precipitação média anual. Por sua vez, relacionando o potencial de secagem com os métodos baseados na temperatura média anual, estes também não apresentavam semelhanças, o que foi considerado surpreendente uma vez que o potencial de secagem está diretamente relacionado com a temperatura. Em relação aos métodos dependentes do tipo de construção Cornick *et al.* [34] afirma que estes ao serem comparados com o método baseado no *Moisture Index* apresentam algumas divergências.

Por outro lado, em Salonvaara *et al.* [50] afirma-se que nenhum dos métodos utilizados para seleção do *MRY* é satisfatório, defendendo que os métodos baseados no *RHTI* (*Relative Humidity and Temperature Index*) [51] são os mais rigorosos e que se aproximam mais das condições reais.

Recentemente foi desenvolvida por Zhou *et al.* [15] uma metodologia que relaciona a utilização de um *Climatic Index* (*CI*), para a avaliação das condições meteorológicas, com o *RHTI* que permite avaliar o comportamento higrotérmico do elemento construtivo em estudo. Para o efeito, são necessários quatro procedimentos distintos:

- Primeiro é necessário calcular para os anos considerados o *Climatic Index* [15] que, à semelhança do Método Combinado, é definido pelo quociente entre o potencial de humidificação [39-45, 52] e o potencial de secagem, sendo este último, neste caso, denominado por potencial de evaporação [53-57] (quanto maior o *CI*, maiores os riscos de humidificação);
- Em seguida, selecionam-se três anos com base no critério dos 10% em relação ao *CI*;
- Posteriormente recorre-se à simulação higrotérmica do elemento construtivo em estudo, considerando como dados de entrada os 3 anos selecionados, e determinam-se os valores dos *RHTI* [51]. Este índice, por sua vez, relaciona as condições de temperatura e humidade relativa existentes na zona mais crítica do elemento construtivo, com as suas condições limites, tendo em conta a durabilidade dos materiais que constituem o elemento construtivo.
- Por último, seleciona-se o ano com o maior valor do *RHTI*, correspondendo este ao *MRY*.

De acordo com Zhou *et al.* [15], a combinação do *RHTI* com o *CI* permite fazer uma seleção do *MRY* de uma forma mais precisa e fiável. Este procedimento é também uma metodologia concisa e que pode ser aplicada a diferentes orientações e composições de paredes, tendo em conta as variações climáticas de cada região.

2.3. OBSERVAÇÕES FINAIS

Uma vez que existem várias metodologias para a classificação climática das diversas regiões do planeta, metodologias estas baseadas em diversos parâmetros e cuja relevância de cada um difere entre elas, é de notória importância que se faça uma escolha prévia sobre a metodologia a utilizar, tendo em conta a finalidade de cada uma delas e os objetivos que levaram ao desenvolvimento das mesmas. Para melhor se compreender e avaliar o clima presente na localidade em estudo, e posteriormente se relacionar com os objetivos do trabalho a desenvolver, é também necessário ter em conta a complexidade de cada uma das metodologias existentes assim como as suas vantagens e desvantagens em relação a outras metodologias de classificação climática.

Em relação à avaliação do comportamento higrotérmico dos edifícios, Kalamees e Kurnitski [19] afirmam ainda que é necessário ter em atenção o propósito a que se destina a análise, pois a relevância de cada parâmetro meteorológico é diferente de situação para situação. Assim, estes parâmetros podem ser contemplados na criação dos anos climáticos de referência para cálculos energéticos com um peso associado diferente. No entanto, é de notar que não se pode afirmar que um é mais importante do que outro, isto é, a humidade não afeta os requisitos de aquecimento, mas interfere bastante na capacidade de refrigeração, enquanto a temperatura e a radiação solar influenciam os requisitos de aquecimento e arrefecimento. Por outro lado, o ano climático de referência não deve ser construído em específico para um edifício, por isso, deve estar possibilitada a sua utilização para todos os casos.

Quanto as simulações higrotérmicas, Kalames e Vinha [17], referem que conforme o tipo de material pode haver maior ou menor risco de suscetibilidade devido aos problemas de condensações, sendo que na maior parte dos casos, a acumulação excessiva de humidade nos materiais ou o vapor de água que se acumula nos mesmos pode alterar as características desses mesmos materiais. Isto leva a problemas relacionados com a deformação dos materiais, perdas de calor e energia, assim com a deterioração dos mesmos e corrosão da própria estrutura. Outro dos problemas existentes é que durante o processo de condensação, a água pode fluir até a base da parede, contribuindo para uma maior dificuldade de secagem da mesma. É de notar que a maior parte desses problemas é causado devido a condensações, sendo estas originadas pelos excessos de humidade relativa presente no ar e consequentemente nos próprios materiais de construção, variando de material para material, conforme as suas propriedades.

Desta forma, os edifícios devem ser construídos tendo em atenção o clima do local onde se inserem, uma vez que a solicitação climática terá impacto na escolha das soluções que garantam uma melhor performance a nível higrotérmico e energético.

3

TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS CLIMÁTICOS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como referido anteriormente, a construção de um ano climático de referência requer dados meteorológicos horários de qualidade e com uma série de dados de pelo menos 10 anos. Estes dados podem ser obtidos em estações meteorológicas que contenham registos dos parâmetros pretendidos. A obtenção destes dados em Portugal nem sempre é fácil pois, apesar de existirem inúmeras estações meteorológicas, quando os dados são disponibilizados online, apenas são fornecidas as médias diárias, mensais ou máximos e mínimos. Em alguns casos, também existem falhas no registo de dados, o que dificulta este processo, sendo necessário proceder à sua colmatação, existindo diversas metodologias para o efeito. Na elaboração do presente trabalho, utilizaram-se os dados da estação meteorológica do Laboratório de Física das Construções (LFC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Quanto ao período em estudo, foram apenas analisados os anos pertencentes ao intervalo de 2009 a 2016 inclusive. Este período não respeita os 10 anos necessários para a definição de um ano de referência, uma vez que não havia dados anteriores a 2009 disponíveis. No entanto, considerou-se que a utilização de uma série menor não seria condicionante pois os dois principais objetivos deste trabalho eram comparar os diferentes métodos existentes para definir o *MRY* e comparar os resultados da simulação higrotérmica utilizando o *MRY*, definido no âmbito deste trabalho, e o *TRY* criado por Sousa [58], utilizando a mesma série de dados.

Como a série de dados fornecida pelo LFC tinha falhas significativas, foi necessário proceder-se à sua colmatação, de acordo com metodologias distintas, que tinham em conta a especificidade do parâmetro climático em causa e a dimensão do período de falhas. Para o efeito foi necessário recorrer a dados climáticos da estação meteorológica do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI). Uma vez que a estação meteorológica do INEGI não possui dados de algumas variáveis meteorológicas, foi também indispensável a utilização dos dados da estação meteorológica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), acessíveis através do site da instituição [59]. É de notar que as estações meteorológicas referidas se encontram próximas (Figura 7), pelo que se assumiu que não existiriam diferenças significativas em relação aos dados medidos pela estação meteorológica do LFC, tendo em conta os objetivos deste estudo.

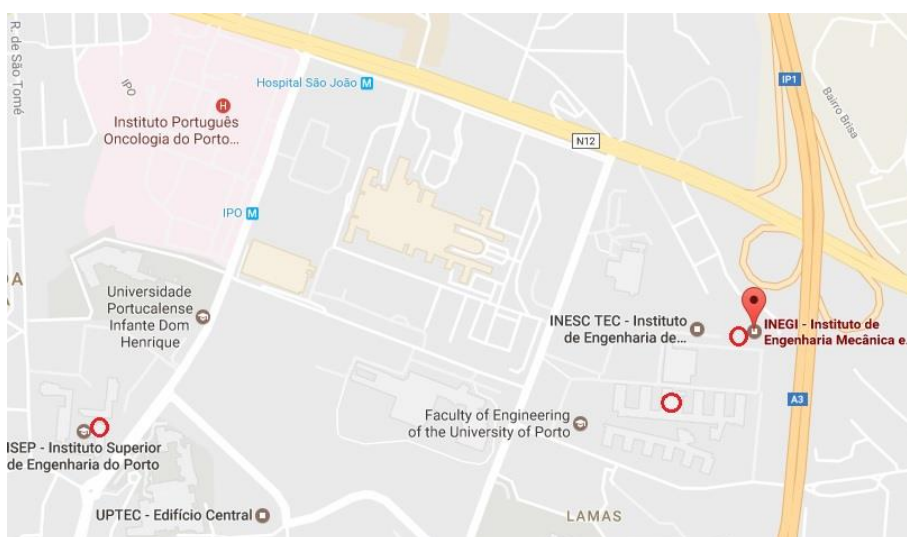


Figura 7 – Localização das estações meteorológicas [60]

3.2. METODOLOGIA APLICADA NA COLMATAÇÃO DE FALHAS

Na colmatação de falhas, foi necessário analisar os dados cedidos pela estação meteorológica do LFC/FEUP e definir quais os processos a utilizar, tendo em conta o intervalo de tempo das falhas e a variabilidade do parâmetro climático em questão. Para efeito, foram analisados os seguintes parâmetros meteorológicos:

- Temperatura [°C];
- Humidade relativa [-];
- Radiação atmosférica [W/m²];
- Pressão atmosférica [hPa];
- Direção do vento [°];
- Radiação solar difusa [W/m²];
- Radiação solar global [W/m²];
- Precipitação [mm];
- Velocidade do vento [m/s].

Numa primeira fase foram calculadas, para todos os parâmetros e para todos os anos, as médias horárias, uma vez que as estações meteorológicas que mediram os dados utilizados, faziam recolhas com frequências inferiores (estação meteorológica do LFC efetua medições de 10 em 10 minutos e a estação meteorológica do INEGI efetua medições de minuto a minuto).

Posteriormente, procedeu-se à análise dos dados horários e identificaram-se os períodos de falhas, cujas percentagens serão indicadas à frente neste capítulo, segundo três intervalos de tempo distintos:

- Intervalos de falhas de 1 hora;
- Intervalos de falhas de 2 a 24 horas;
- Intervalos de falhas superiores a 24 horas.

No primeiro caso, mais simples, as falhas foram colmatadas através do cálculo da média entre a hora anterior e seguinte à falha, tendo este método sido aplicado a todos os parâmetros meteorológicos.

Por outro lado, para a colmatação de falhas referentes a períodos de 2 a 24 horas, foi feita, para cada hora, a média dos valores correspondentes do dia anterior e seguinte, isto é, para a colmatação da falha relativa às 00:00 horas do dia em falta, foi feita a média entre o valor das 00:00 horas do dia anterior e seguinte, para o parâmetro em questão. Este processo foi aplicado a todos os parâmetros à exceção da precipitação. Para melhor se ilustrar o processo de colmatação efetuado, a Figura 8 apresenta um exemplo para a colmatação da temperatura.

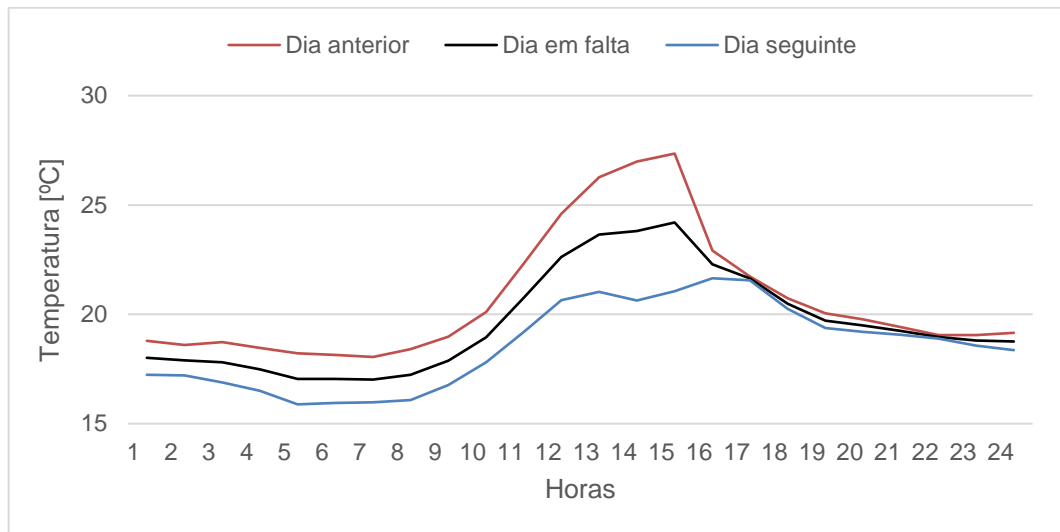


Figura 8 – Colmatação da temperatura para períodos de falhas de 2 a 24 horas

Quanto à precipitação, períodos com falhas superiores a 2 horas, foram colmatados através dos dados fornecidos pelo ISEP, acessíveis através do site da instituição, tal como foi referido anteriormente. É de notar que existiram alguns períodos de falhas coincidentes nas duas estações, sendo necessário recorrer a uma colmatação distinta. Neste caso, a colmatação foi feita através da média dos valores horários correspondentes ao período de anos em estudo, para a mesma hora, do mesmo dia, do mesmo mês, ou seja, para a colmatação da hora 00:00 do dia 7 de janeiro de 2009, foi feita uma média dos valores referentes à hora 00:00 do dia 7 de janeiro dos restantes anos da série (2010 a 2016). Este processo está ilustrado no exemplo da Figura 9.

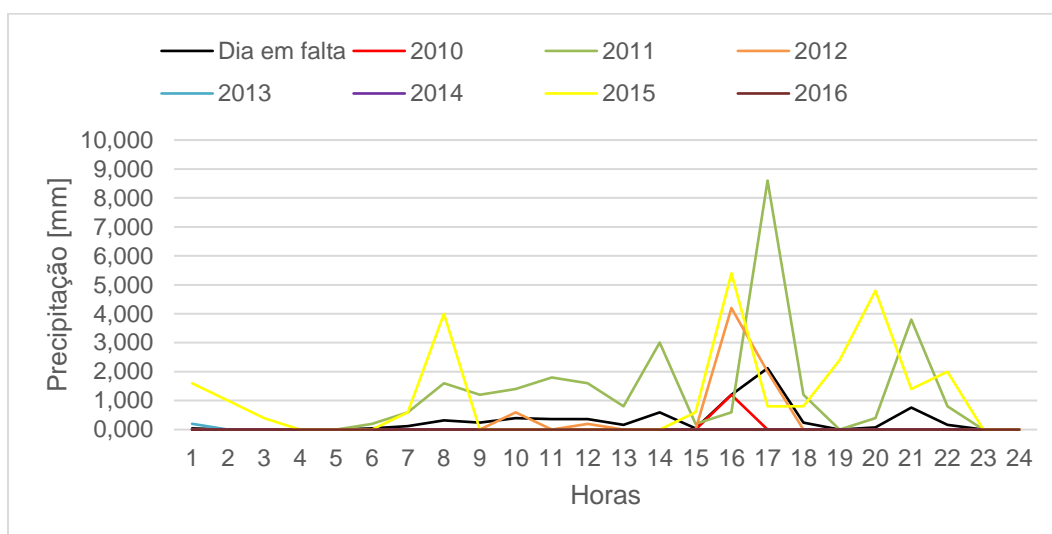


Figura 9 – Colmatção dos valores da precipitação para períodos de falhas superiores a 2 horas cujas falhas eram coincidentes entre as duas estações

Em relação aos períodos com intervalos de falhas superiores a 24 horas, foram colmatados através dos dados provenientes da estação meteorológica do INEGI, à exceção da precipitação (colmatada através da metodologia anteriormente descrita), radiação solar global, radiação atmosférica e radiação solar difusa, uma vez que esta estação não possui os equipamentos necessários para a medição desses parâmetros. A colmatção da radiação solar global, para períodos superiores a 24 horas, foi feita através dos dados da estação meteorológica do ISEP.

Dado que nem a estação meteorológica do ISEP nem a estação meteorológica do INEGI, possuem dados sobre a radiação atmosférica, as falhas correspondentes a períodos superiores a 24 horas foram colmatadas através da média dos valores horários correspondentes ao período anterior e posterior mais próximo, com dados, isto é, para períodos de falhas de “X” dias, foram efetuadas as médias dos valores horários correspondentes a “X” dias anteriores e seguintes (Figura 10). O mesmo procedimento foi utilizado para os restantes parâmetros sempre que existiam falhas coincidentes nas estações, à exceção da precipitação e da radiação solar difusa.

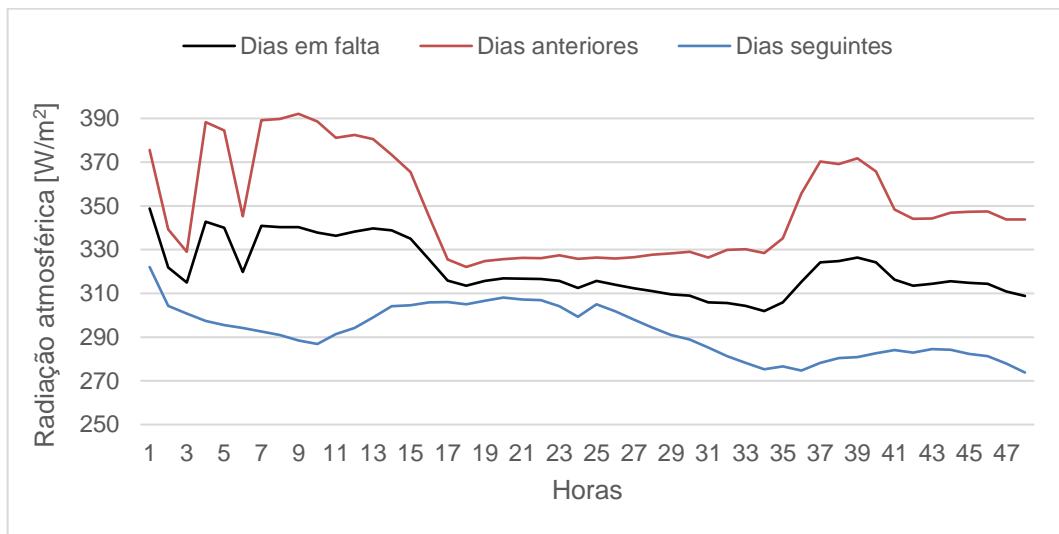


Figura 10 – Colmatção dos valores da radiação atmosférica para períodos de falhas superiores a 24 horas

Por outro lado, uma vez que a radiação solar global era conhecida, tendo sido previamente colmatada, foi possível calcular os valores da radiação solar difusa através de um método que relaciona as duas radiações. Desta forma, para colmatar as falhas referentes à radiação solar difusa foi utilizado o método de cálculo apresentado por Duffie e Beckman [61], que aplica a correlação de Collares-Pereira e Rabl [62] (Equação 1), sendo esta a que traduz com menor erro, a relação entre a radiação solar difusa (D_h) e a radiação solar global (G_h), numa superfície horizontal.

$$\frac{D_h}{G_h} = 0,775 + 0,00653 * (\Omega - 90) - [0,505 + 0,00455 * (\Omega - 90)] * \cos(115 * K_T - 103) \quad (1)$$

Esta relação, depende do índice de claridade diário médio mensal (K_T), cujos valores para a cidade do Porto são apresentados na Tabela 1, e do ângulo horário de pôr-do-sol (Ω), sobre uma superfície horizontal, sendo este último dependente da latitude do local (\varnothing) e da declinação do sol (δ), (Equação 2).

Tabela 1 – Valores diários médios mensais do índice K_T para a cidade do Porto [63]

Mês	K_T	Mês	K_T	Mês	K_T	Mês	K_T
Janeiro	0,465	Abril	0,619	Julho	0,674	Outubro	0,544
Fevereiro	0,522	Maio	0,617	Agosto	0,659	Novembro	0,498
Março	0,545	Junho	0,641	Setembro	0,604	Dezembro	0,475

$$\Omega = \arccos(-\tan\delta * \tan\varnothing) \quad (2)$$

Neste trabalho foi considerada uma latitude de $41,13^\circ$ para a cidade do Porto. Por sua vez, a declinação do sol, foi obtida de acordo com a Equação 3, dependendo do número de horas solares por dia (η):

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360 * \frac{284 + \eta}{365}\right) \quad (3)$$

Note-se que esta metodologia admite que a radiação solar difusa é isotrópica, ou seja, a radiação solar difusa é a mesma para qualquer orientação da superfície [61]. É também importante salientar que o índice de claridade é um índice diário médio mensal, o que significa que é calculado tendo em conta os valores diários médios de cada mês, o que pode dar origem a valores menos aproximados, uma vez que os valores da radiação solar global utilizados foram valores médios horários, obtendo-se desta forma valores horários médios para a radiação solar difusa.

Para melhor ilustrar o método acima descrito e de forma a evidenciar as diferenças entre a radiação solar difusa medida e a calculada, utilizaram-se os dados climáticos referentes ao ano de 2011, já que estes não possuem falhas na radiação solar global e difusa. Na Figura 11, apresenta-se o gráfico correspondente aos valores da radiação solar difusa medida e calculada, sendo possível verificar algumas discrepâncias ao longo do ano. A Figura 12 mostra um dia de verão e um dia de inverno em que os valores medidos e calculados são consideravelmente diferentes. Existem, contudo, períodos de maior proximidade entre esses valores (Figura 13), tanto nos meses de inverno como nos meses de verão, sendo a diferença entre eles, superior nos meses de verão.

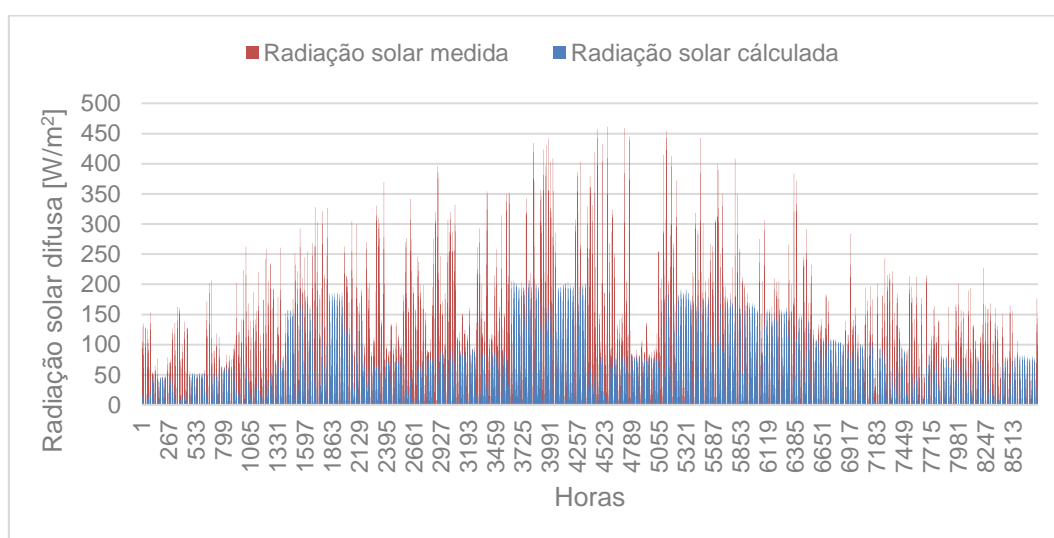


Figura 11 – Diferenças entre os valores da radiação solar difusa medida e calculada ao longo do ano

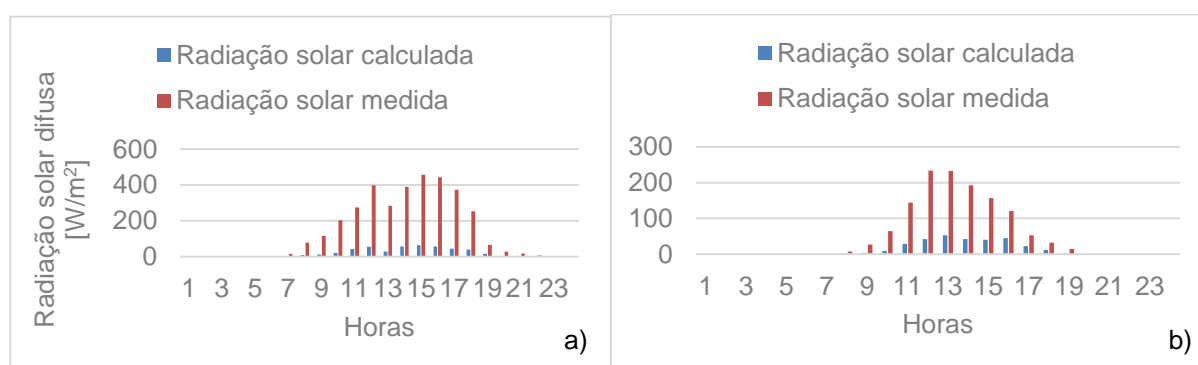


Figura 12 – Dissemelhanças entre os valores da radiação solar difusa medida e calculada: a) dia 5 de julho de 2011, b) dia 22 de fevereiro de 2011

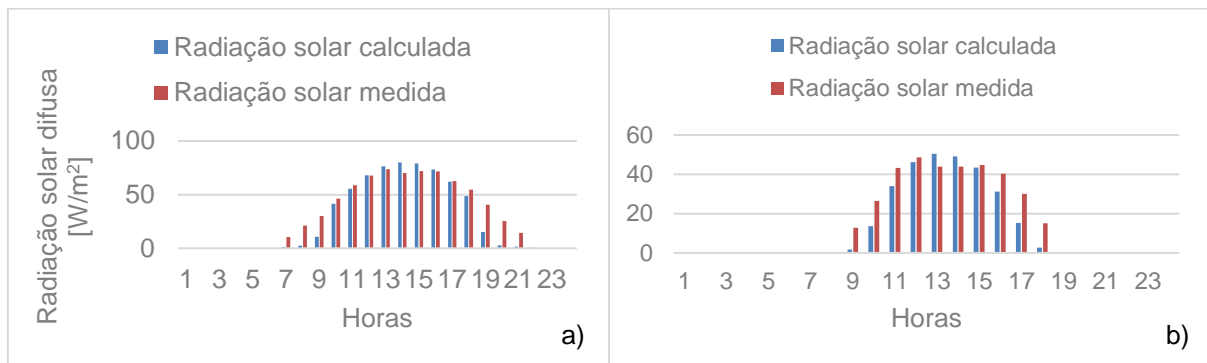


Figura 13 – Proximidade entre os valores da radiação solar difusa medida e calculada: a) dia 20 de julho de 2011, b) dia 23 de janeiro de 2011

Tais conclusões devem-se ao facto de a radiação solar global no verão ser superior à radiação solar global nos meses de inverno, sendo os valores da radiação solar difusa calculada consequentemente superiores nos meses de verão. Por sua vez, fatores como a nebulosidade reduzem a radiação solar direta fazendo com que a radiação solar difusa se aproxime dos valores da radiação solar global, o que acontece mais frequentemente nos meses de inverno, comparativamente com os meses de verão em que o céu se encontra maioritariamente limpo ao longo do dia. Desta forma, a utilização desta metodologia para determinação dos valores da radiação solar difusa é mais viável nos meses de inverno do que nos meses de verão, apesar da imprevisibilidade de alguns parâmetros que influenciam esta relação, como é o caso da nebulosidade.

É também possível verificar na Figura 13 uma maior divergência entre os valores da radiação difusa medida e calculada, nas horas iniciais e finais do dia, o que se reflete numa menor viabilidade do método utilizado, nessas situações. Outra das observações efetuadas é o facto da radiação solar difusa medida apresentar, na maior parte dos casos, valores superiores ao da radiação solar difusa calculada.

Quanto aos restantes parâmetros resta ressaltar que, devido ao grande número de falhas na direção do vento, entre os anos de 2011 e 2015 inclusive, esses dados foram todos substituídos pelos valores do INEGI, nesses mesmos anos.

Por fim, e para melhor evidenciar as falhas existentes, foi calculada a percentagem de falhas referente a cada parâmetro meteorológico, em cada ano, assim como a percentagem de falhas total dos respetivos anos (Figura 14, Figura 15 e Figura 16).

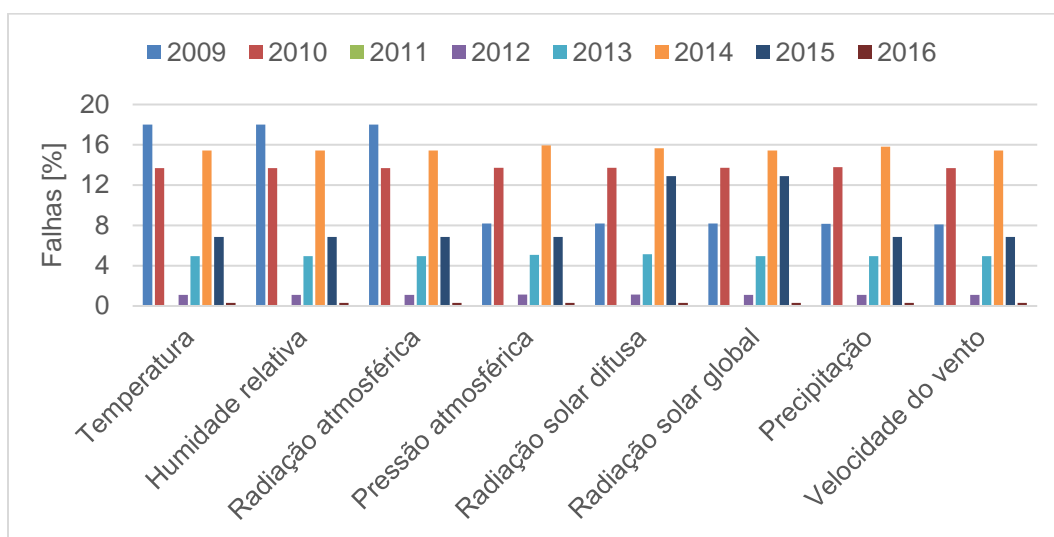


Figura 14 – Percentagem de falhas existentes em cada ano e para cada parâmetro (à exceção da direção do vento)

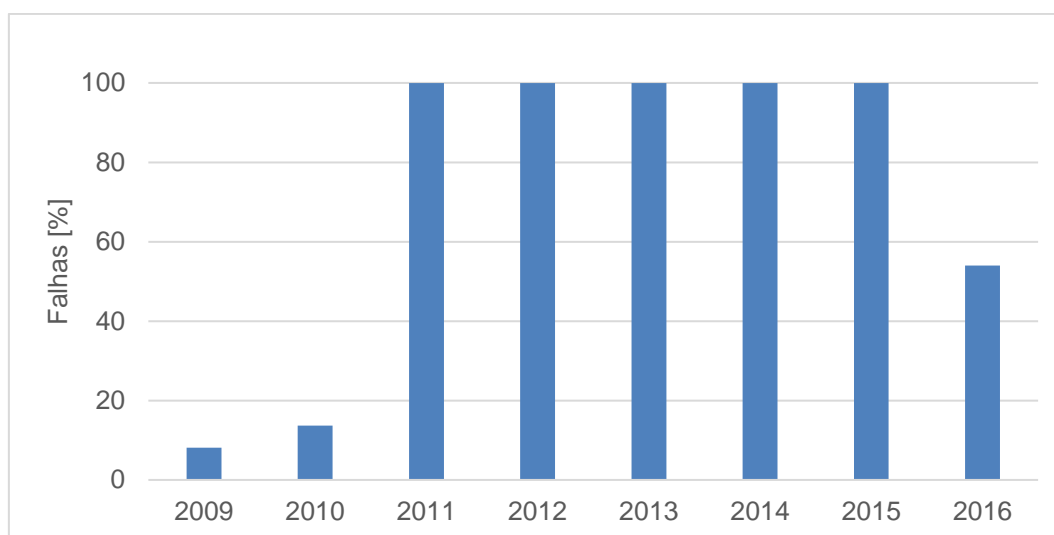


Figura 15 – Percentagem de falhas existentes em cada ano para a direção do vento

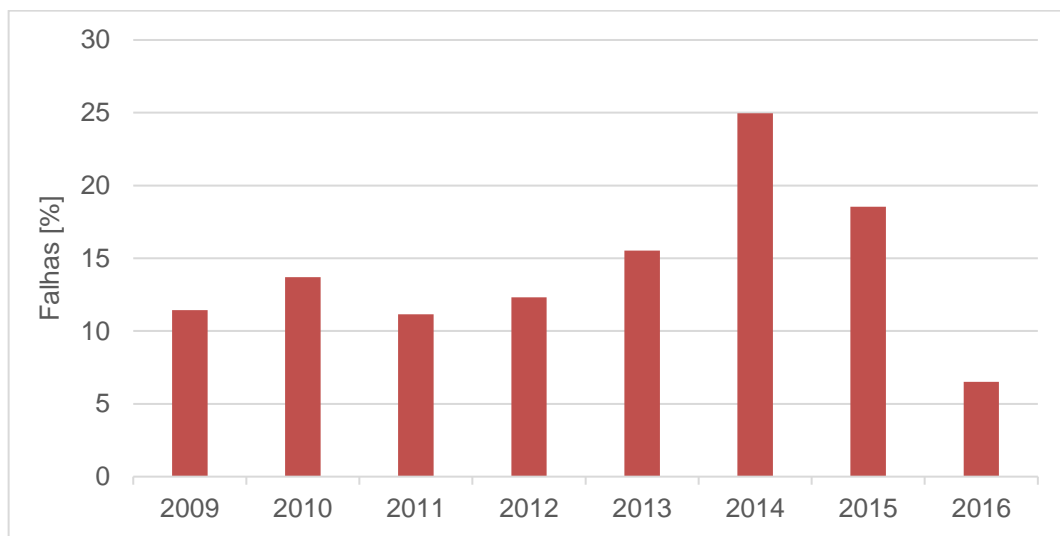


Figura 16 – Percentagem total de falhas existentes em cada ano

De acordo com o gráfico anteriormente apresentado (Figura 16), é possível verificar que o ano com maior percentagem de falhas é o ano 2014, com a totalidade de 24,96% de falhas, seguindo-se 2015 com 18,54% e posteriormente 2013 com 15,53%.

Quanto ao parâmetro que possui o maior número de falhas, destaca-se a direção do vento, uma vez que não havia dados de 2011 a 2015 inclusive, tendo sido todos substituídos pelos dados provenientes da estação meteorológica do INEGI.

Em relação aos restantes parâmetros, é possível verificar que em 2009 os parâmetros com mais falhas verificadas foram a temperatura, humidade relativa e radiação atmosférica com 18,01% de falhas, seguindo-se os restantes parâmetros com cerca de 8,15%. Em 2010, a percentagem de falhas para todos os parâmetros foi de cerca de 13,7%. No ano de 2011, as falhas foram mínimas, cerca de 0,05% para todos os parâmetros, à exceção da direção do vento que atinge os 100% de falhas. Para 2012, a percentagem de falhas em todos os parâmetros foi de 1,10%, à exceção da direção do vento. Em 2013, a percentagem de falhas verificadas em todos os parâmetros foi de cerca de 5%, com exceção da direção do vento. Quanto ao ano de 2014, apresenta falhas cujos valores rondam os 15,5% em todos os parâmetros, à exceção da direção do vento. Por outro lado, 2015 foi o ano menos homogêneo, verificando-se percentagens de falhas de 6,85% para todos os parâmetros, à exceção da radiação solar global e difusa cujo valor é de 12,9% e da direção do vento que atinge os 100% de falhas. Por fim, 2016 foi um ano com poucas falhas, possuindo 0,3% de falhas para todos os parâmetros, à exceção da direção do vento em que se verificou cerca de 54% de falhas.

3.3. DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS

Uma vez finalizado o processo de colmatação de falhas existentes nos dados climáticos em estudo, foi feito o tratamento estatístico dos dados resultantes, tendo como objetivo avaliar de uma forma assertiva e detalhada, os vários parâmetros meteorológicos que constituem o clima do Porto e tendo em conta o intervalo de tempo analisado (2009 a 2016). Para tal, foram utilizadas medidas estatísticas descritivas, como a média, a mediana, o máximo, o mínimo, o desvio-padrão, o coeficiente de variação e o coeficiente de assimetria, aplicados a cada parâmetro meteorológico de cada ano. Assim, é possível

perceber qual a localização do centro da amostra e em que intervalo esta se encontra, assim como a dispersão dos valores da mesma em relação ao seu centro, a sua homogeneidade e qual o tipo de assimetria que esta apresenta. Foram também criados *boxplots* para auxiliar na interpretação dos dados, uma vez que esses diagramas permitem-nos visualizar o conjunto de dados de uma forma simplificada e ter noção da dispersão do mesmo através de informações como a mediana ou 2º quartil, 1º e 3º quartis, extremo inferior e extremo superior e *outliers*. Desta forma, com o auxílio dos programas *Microsoft Office Excel 2016* e do *IBM SPSS Statistics 24*, foram calculadas as medidas estatísticas para cada parâmetro e obtidas as representações gráficas correspondentes.

Através da Figura 17 e da Tabela 2, é possível verificar que relativamente à temperatura, não existem grandes desigualdades entre os diferentes anos da amostra, o que é justificável pela regularidade dos padrões da variável climática em análise.

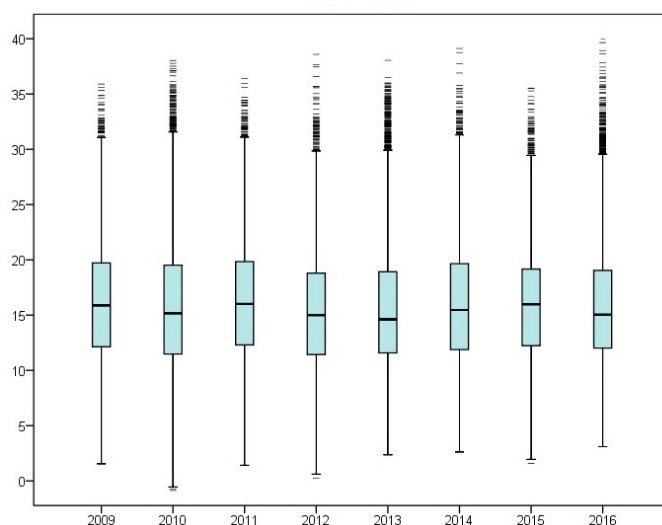


Figura 17 – *Boxplot* dos valores médios horários da temperatura [°C]

Tabela 2 – Medidas estatísticas referentes aos valores médios horários da temperatura [°C]

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Média	16,12	15,74	16,26	15,29	15,66	15,98	16,00	15,87
Mediana	15,88	15,17	16,02	14,98	14,62	15,47	15,98	15,02
Máximo	35,90	38,03	36,42	38,58	38,05	39,12	35,53	40,17
Mínimo	1,55	-0,87	1,42	0,25	2,37	2,62	1,58	3,10
Desvio-padrão	5,37	6,28	5,65	5,43	5,86	5,43	5,24	5,69
Coeficiente de variação [%]	33,32	39,92	34,74	35,54	37,45	33,99	32,73	35,86
Coeficiente de assimetria	0,32	0,43	0,27	0,36	0,67	0,44	0,25	0,66

Quanto ao valor máximo da temperatura, foi registado em 2016, tendo sido o mínimo registado no ano de 2010. Por outro lado, os valores mais elevados do coeficiente de assimetria foram verificados em 2013 e 2016, sendo estes positivos, existindo desta forma uma maior frequência de valores superiores à média nesses mesmos anos. Tal facto, pode ser justificado pela presença abundante de *outliers* junto ao extremo superior da amostra (Figura 17). No que diz respeito à variabilidade dos valores em torno da média, a amostra apresenta uma relativa homogeneidade, caracterizada pelos coeficientes de variação que variam entre 33% e 40%, estando este fenómeno directamente relacionado com a amplitude térmica do local em estudo.

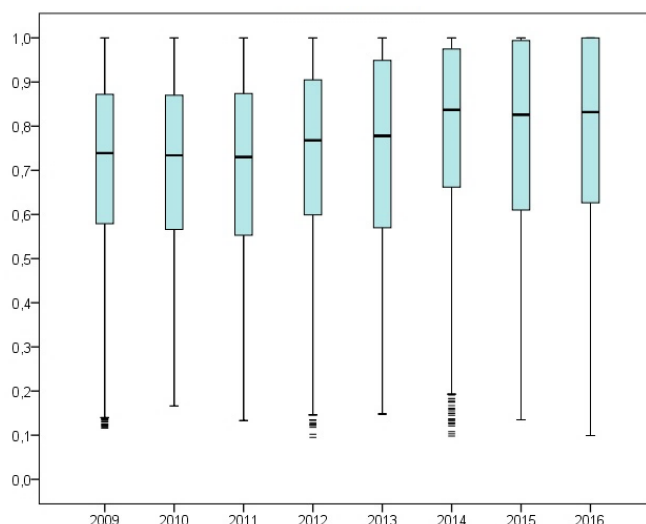


Figura 18 – Boxplot dos valores médios horários da humidade relativa [-]

Tabela 3 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da humidade relativa [-]

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Média	0,71	0,70	0,70	0,74	0,74	0,79	0,77	0,78
Mediana	0,74	0,73	0,73	0,77	0,78	0,84	0,83	0,83
Máximo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Mínimo	0,12	0,17	0,13	0,09	0,15	0,10	0,14	0,10
Desvio-padrão	0,20	0,20	0,20	0,20	0,22	0,20	0,22	0,21
Coeficiente de variação [%]	27,85	27,71	28,79	27,31	29,61	25,41	27,92	27,10
Coeficiente de assimetria	-0,67	-0,53	-0,43	-0,59	-0,49	-0,89	-0,65	-0,71

Relativamente aos valores do coeficiente de variação registados na Tabela 3, referentes à humidade relativa (cerca de 27% de variação em quase todos os anos), estes são inferiores aos verificados para o parâmetro da temperatura, refletindo-se numa maior homogeneidade deste parâmetro, apesar dos dois estarem directamente relacionados. Contrariamente ao parâmetro da temperatura, a humidade relativa

apresenta assimetria negativa, tendo-se verificado os valores máximos, nos anos 2014 e 2016. Note-se, que foi visível uma tendência crescente dos valores da média e mediana, ao longo dos anos analisados.

Em relação à radiação atmosférica, este é um parâmetro cuja variação é relativamente pequena, uma vez que o coeficiente de variação se situa entre os 11% e os 12%, em todos os anos (Tabela 4). No que diz respeito ao coeficiente de assimetria deste parâmetro, a amostra apresenta uma assimetria negativa e pouco acentuada, verificando-se o máximo deste valor em 2010.

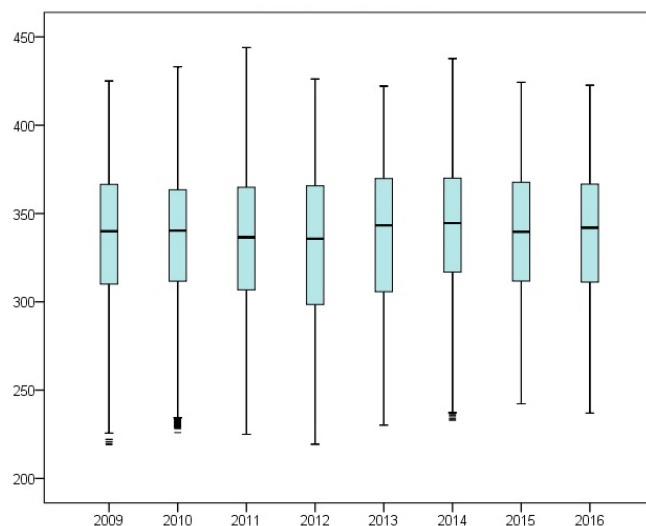


Figura 19 – *Boxplot* dos valores médios horários da radiação atmosférica [W/m²]

Tabela 4 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da radiação atmosférica [W/m²]

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Média	337,94	335,53	334,28	332,53	337,52	342,59	339,01	337,83
Mediana	339,95	340,35	336,55	335,86	343,29	344,58	339,63	341,83
Máximo	425,04	433,07	444,00	426,18	422,15	437,72	424,29	422,68
Mínimo	219,08	225,94	224,94	219,41	230,17	232,94	242,28	236,95
Desvio-padrão	37,72	39,51	40,43	42,39	41,72	37,29	37,46	36,77
Coeficiente de variação [%]	11,16	11,77	12,10	12,75	12,36	10,88	11,05	10,88
Coeficiente de assimetria	-0,18	-0,47	-0,25	-0,18	-0,29	-0,16	-0,07	-0,28

No que se refere à pressão atmosférica, apresenta a menor variação de entre os parâmetros analisados, tendo-se verificado um coeficiente de variação de 0,7% em todos os anos, à exceção de 2015 cujo valor é de 0,6% (Tabela 5). Quanto ao coeficiente de assimetria, este é aproximadamente nulo no ano de 2012, positivo no ano de 2015 e apresenta valores negativos nos restantes anos. Este fenómeno deve-se à elevada estabilidade deste parâmetro, fazendo com que a existência de *outliers* junto ao extremo inferior assim como no extremo superior (Figura 20), provoquem estas variações de sinal em relação ao

coeficiente de assimetria. Apesar do anteriormente referido, é notória uma maior presença de *outliers* nas proximidades do extremo inferior, refletindo-se numa maior tendência assimétrica negativa para este parâmetro. Quanto ao máximo desse parâmetro estatístico, verificou-se em 2009, sendo este negativo, significando a existência de uma maior quantidade de dados cujos valores se situaram abaixo da média.

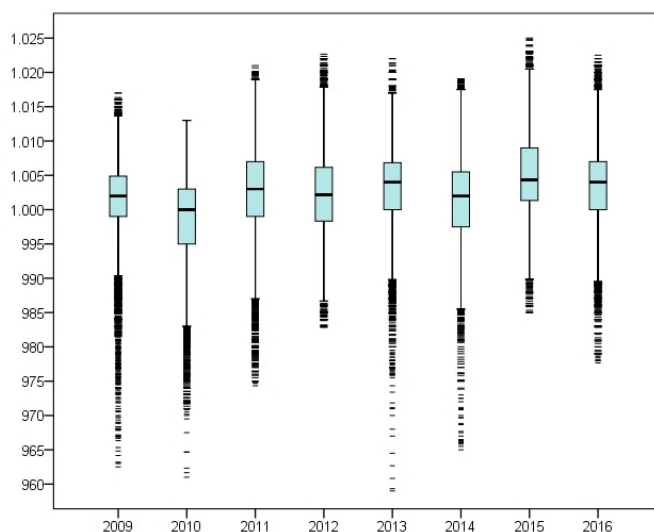


Figura 20 – *Boxplot* dos valores médios horários da pressão atmosférica [hPa]

Tabela 5 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da pressão atmosférica [hPa]

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Média	1000,8	998,3	1002,5	1002,5	1002,8	1001,6	1005,2	1003,5
Mediana	1002,0	1000,0	1003,0	1002,2	1004,0	1002,0	1004,3	1004,0
Máximo	1017,0	1013,0	1021,0	1022,7	1022,0	1019,0	1025,0	1022,5
Mínimo	962,5	961,0	974,3	982,8	959,0	965,0	985,0	977,7
Desvio-padrão	6,6	7,2	7,2	6,6	6,7	6,9	6,1	6,6
Coeficiente de variação [%]	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7
Coeficiente de assimetria	-1,7	-1,1	-0,6	0,0	-0,9	-0,4	0,2	-0,3

No que respeita aos parâmetros da radiação solar difusa e radiação solar global (Figura 21 e Figura 22), cujos valores das medidas estatísticas estão presentes na Tabela 6 e Tabela 7, são parâmetros meteorológicos cuja assimetria positiva é evidente. Isto, deve-se ao facto de existirem muitos valores nulos na amostra total de dados, referentes às horas de ausência de sol, o que faz com que a média se aproxime desse valor. Quanto ao coeficiente de variação verificado em todos os anos, ronda os 150% para ambas as variáveis em análise, sendo este um valor elevado, o que seria de esperar de acordo com o facto anteriormente referido. É importante salientar que o ano 2015 é o ano em que se verificou o

maior valor do desvio-padrão e o maior valor do máximo, em relação a ambas as radiações solares, o que é perfeitamente justificável pelo facto de esse ano ter sido o ano com maior percentagem de falhas em relação a esses dois parâmetros, cerca de 12,9%.

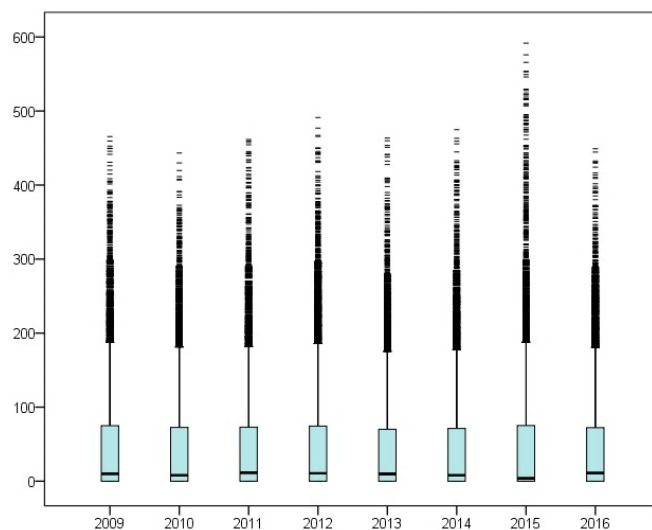
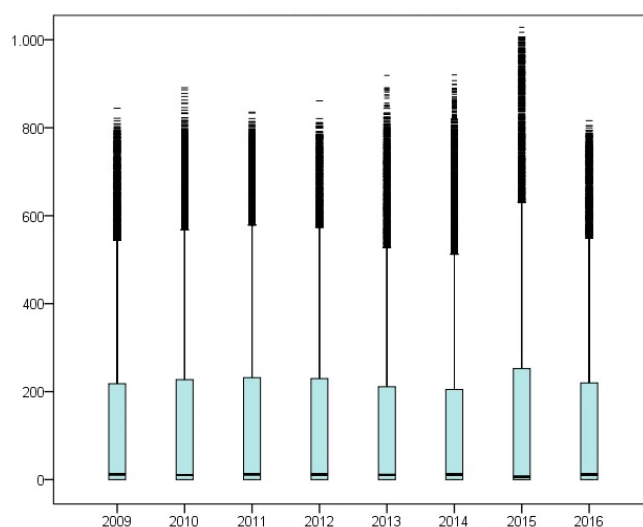


Figura 21 – *Boxplot* dos valores médios horários da radiação solar difusa [W/m²]

Tabela 6 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da radiação solar difusa [W/m²]

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Média	48,49	45,25	47,86	51,46	45,97	46,64	51,03	47,58
Mediana	10,00	8,10	11,50	10,67	9,78	8,00	4,00	11,00
Máximo	465,40	443,33	461,50	491,17	463,50	474,80	591,67	449,00
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Desvio-padrão	73,24	67,94	72,05	78,36	69,15	72,23	82,16	70,49
Coeficiente de variação [%]	151,04	150,12	150,55	152,26	150,42	154,88	160,99	148,15
Coeficiente de assimetria	2,06	1,98	2,15	2,01	2,05	2,08	2,46	1,95

Figura 22 – Boxplot dos valores médios horários da radiação solar global [W/m²]Tabela 7 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da radiação solar global [W/m²]

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Média	140,55	145,30	144,80	139,44	140,21	137,29	159,28	140,45
Mediana	12,00	10,50	12,00	11,50	10,83	11,50	6,67	11,63
Máximo	844,40	891,00	835,50	861,17	919,00	920,00	1028,33	816,00
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Desvio-padrão	215,04	223,97	219,05	210,42	219,25	216,08	246,61	216,58
Coeficiente de variação [%]	153,00	154,14	151,28	150,90	156,38	157,39	154,83	154,21
Coeficiente de assimetria	1,46	1,48	1,44	1,46	1,54	1,62	1,61	1,49

Quanto à precipitação é o parâmetro cuja tendência é a mais imprevisível, o que é possível verificar através do coeficiente de variação presente na Tabela 8, que atinge o máximo de 612,38%, no ano 2011. Por sua vez, 2011 é o ano com menor número de falhas em relação a esse parâmetro (0,05%), sendo possível afirmar que este valor máximo não foi de todo influenciado pelo processo de colmatagem de falhas. Quanto ao valor máximo de precipitação horária, foi verificado no ano de 2010. No que respeita à assimetria desta variável, esta apresenta uma assimetria positiva e acentuada, justificável pelos elevados períodos de tempo em que a precipitação é nula, ao longo de todo o ano.

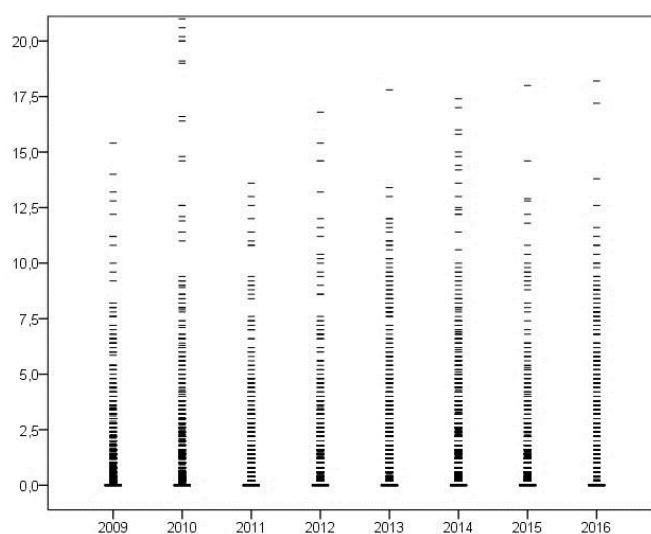


Figura 23 – Boxplot dos valores médios horários da precipitação [mm/h]

Tabela 8 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da precipitação [mm/h]

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Média	0,17	0,19	0,11	0,13	0,21	0,24	0,12	0,20
Mediana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	15,40	21,40	13,60	16,80	17,80	17,40	18,00	18,20
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Desvio-padrão	0,77	1,07	0,69	0,75	0,98	1,03	0,72	0,95
Coeficiente de variação [%]	457,19	549,42	612,38	585,23	457,88	434,32	579,24	462,95
Coeficiente de assimetria	8,66	10,90	10,39	10,73	7,40	7,86	10,83	7,50

Relativamente à velocidade do vento, este parâmetro possui uma média que varia entre 1,18 m/s e 1,83 m/s ao longo dos diferentes anos, tendo sido verificado o maior valor da média anual em 2014 (Tabela 9). Quanto ao valor máximo, este foi verificado em 2010, atingindo o valor de 10,21 m/s. Em relação aos valores do desvio-padrão, esses apresentam os seus máximos nos anos 2010 e 2014, anos esses que correspondem aos anos com maiores falhas, cerca de 13,68% em 2010 e 15,43% em 2014. É possível também verificar através da Figura 24, o maior número de *outliers* nesses mesmos anos, assim como uma maior discrepância desses valores em relação aos valores médios das amostras. No que se refere ao coeficiente de variação, este assume valores entre os cerca de 48% e os 82%, o que se traduz numa variação pouco constante deste parâmetro ao longo da série total de anos, assim como ao longo de cada ano, devido aos elevados valores desse coeficiente, à semelhança do que acontece com a precipitação.

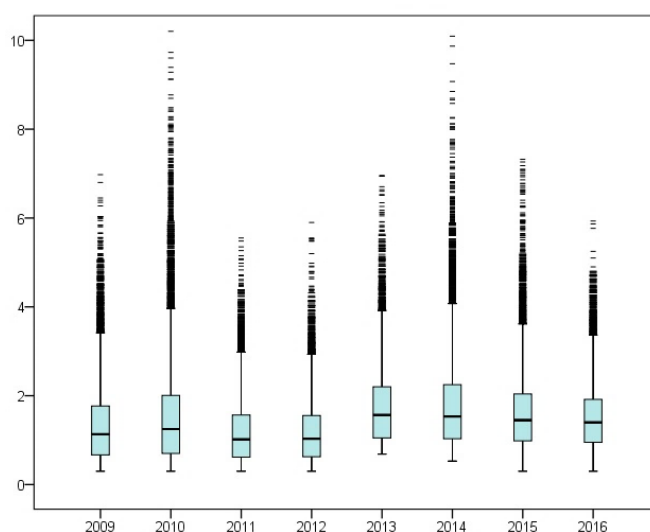


Figura 24 – Boxplot dos valores médios horários da velocidade do vento [m/s]

Tabela 9 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da velocidade do vento [m/s]

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Média	1,36	1,60	1,19	1,18	1,75	1,83	1,66	1,55
Mediana	1,13	1,25	1,02	1,03	1,57	1,53	1,45	1,40
Máximo	6,98	10,21	5,55	5,90	6,96	10,09	7,32	5,93
Mínimo	0,30	0,30	0,30	0,30	0,69	0,53	0,30	0,30
Desvio-padrão	0,94	1,31	0,75	0,72	0,89	1,12	0,92	0,74
Coeficiente de variação [%]	69,16	81,94	63,05	61,03	50,96	61,19	55,10	47,88
Coeficiente de assimetria	1,53	2,07	1,36	1,31	1,36	1,99	1,83	1,29

Por último, através da análise da Figura 25 e da Tabela 10, relativas à direção do vento, é possível verificar que este parâmetro apresenta alguma variabilidade ao longo do ano, cerca de 40%. Este cenário pode ser explicado pela imprevisibilidade desta variável, uma vez que não possui comportamentos típicos e a sua grandeza pode variar num intervalo relativamente grande. A ausência de *outliers* é também visível na Figura 25, o que é esperado já que os valores da série apenas variam entre 0 e 360°. Verificam-se também, tanto assimetrias positivas como assimetrias negativas, apesar desses valores serem pouco acentuados, o que nos indica que a série total de dados está distribuída equilibradamente em torno da média. Tal fenómeno é justificável pela existência de determinadas condições climáticas no local em estudo, assim como as características do mesmo, que influenciam a predominância da direção do vento, entre sul e sudoeste.

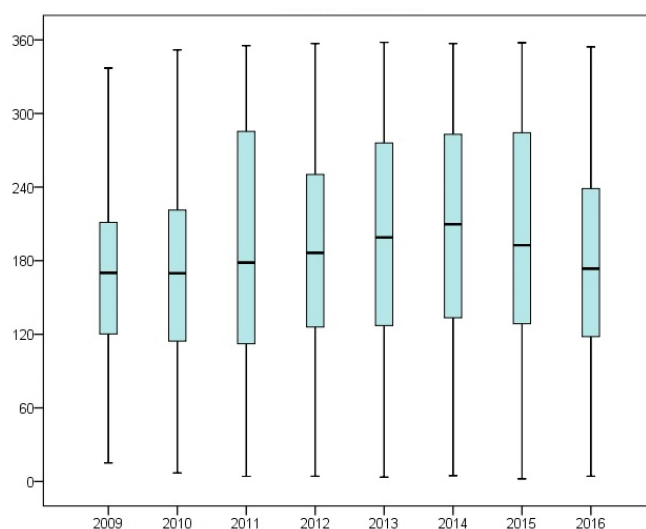


Figura 25 – Boxplot dos valores médios horários da direção do vento [°]

Tabela 10 – Medidas estatísticas descritivas dos valores médios horários da direção do vento [°]

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Média	170,61	173,26	191,18	189,66	198,43	205,63	199,98	180,65
Mediana	170,07	169,80	178,50	186,33	199,00	209,67	192,67	173,17
Máximo	337,00	351,83	355,33	357,00	358,00	357,00	357,67	354,33
Mínimo	15,10	7,00	4,17	4,33	3,50	4,67	2,17	4,33
Desvio-padrão	63,69	70,35	91,31	76,59	88,16	84,67	87,49	76,01
Coeficiente de variação [%]	37,33	40,60	47,76	40,38	44,43	41,18	43,75	42,08
Coeficiente de assimetria	0,26	0,28	0,14	0,12	-0,06	-0,12	0,02	0,30

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em conta os processos de colmatação de falhas referidos anteriormente neste capítulo, é importante realçar que apesar da colmatação efetuada para o preenchimento das falhas referentes a alguns parâmetros, não existem certezas no que toca à variabilidade dos mesmos, uma vez que o clima é inconstante e imprevisível. No entanto, existem algumas tendências e padrões que são previsíveis, partindo do princípio que não ocorrem fenómenos invulgares que possam alterar o comportamento dos mesmos. Apesar da maior parte dos parâmetros analisados possuir um comportamento que segue um determinado padrão, a direção e velocidade do vento, assim como a precipitação são parâmetros cujos padrões são difíceis de prever.

É importante referir que, em alguns casos, foi visível o impacto do processo de colmatação de falhas ao longo do tratamento estatístico, uma vez que este teve influência na tendência natural de variação de

alguns parâmetros, sendo sempre preferível utilizar amostras cuja percentagem de falhas seja a menor possível.

4

CONSTRUÇÃO DO *MOISTURE REFERENCE YEAR***4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Após a pesquisa exaustiva dos vários métodos de determinação do *Moisture Reference Year*, efetuada no capítulo 2, foram analisadas as diferentes metodologias tendo em consideração os dados necessários para a sua determinação, os seus pressupostos de base (dependente ou independente do tipo de construção) e o seu nível de complexidade. Esta análise foi essencial porque de acordo com a análise feita por Djebbar *et al.* [49], não há consenso no que toca à melhor metodologia para construção ou seleção do *MRY*.

Desta forma, decidiu-se abordar três metodologias distintas para determinação do *MRY*, para avaliar as convergências e/ou divergências entre os resultados. As metodologias utilizadas neste trabalho foram:

- Metodologia simples – Baseada no défice de saturação, referido em Kalamees e Vinha [17];
- Metodologia com um nível de complexidade intermedio – Baseada no *Moisture Index*, referido em Cornick *et al.* [34];
- Metodologia complexa – Baseada no *Climatic Index*, referido em Zhou *et al.* [15].

É importante realçar que a amostra de dados climáticos a utilizar para construção dos anos climáticos de referência deve conter, no mínimo, informação relativa a 10 anos, sendo favorável a utilização de amostras maiores para resultados mais fiáveis. Note-se que na elaboração do presente trabalho foi apenas possível obter dados de uma amostra correspondente a um intervalo de 8 anos (período de 2009 a 2016), aproximando-se muito do número mínimo desejado. Com isto, não foi possível obedecer ao critério dos 10%, tendo-se destacado os três anos mais críticos e admitido o *MRY* como o ano mais gravoso, nas três metodologias abordadas.

4.2. METODOLOGIA APLICADA**4.2.1. DÉFICE DE SATURAÇÃO**

Neste método, mais simples, o *MRY* é selecionado com base na análise do risco de condensações do vapor de água, risco esse que é medido pelo potencial de secagem, através do cálculo do défice de saturação. Uma vez que o défice de saturação descreve o potencial de secagem de uma parede, quanto menor o valor deste parâmetro, menor o potencial de secagem. Desta forma, o *MRY* é definido pelo ano com o menor valor do défice de saturação (ano mais crítico).

No presente trabalho, foram utilizadas as fórmulas de Kunzel (Equação 4 e Equação 5) para calcular a pressão de saturação do ar (P_{sat} em Pa) e a pressão de vapor do ar (P em Pa), em função da temperatura

do ar exterior (T em $^{\circ}\text{C}$). Desta forma, o déficit de saturação ($\Delta_{\text{def.sat}}$ em Pa) foi definido pela média dos valores das diferenças entre as pressões anteriormente referidas (Equação 6), ao longo do período de tempo em análise. Tendo em conta que os dados climáticos utilizados tinham uma base horária, estas diferenças foram calculadas hora a hora, tendo-se obtido o valor anual do déficit de saturação através da média dos valores horários referentes a cada ano da série de dados utilizada.

$$P_{\text{sat}} = 611 * e^{\left(\frac{a \cdot T}{t' + T}\right)} \quad (4)$$

Sendo $a=22,44$ e $t'=272,44$ para $T < 0$; $a=17,08$ e $t'=234,18$ para $T \geq 0$;

$$P = \frac{P_{\text{sat}} \cdot \text{HR}}{100} \quad (5)$$

com a humidade relativa (HR) em %.

$$\Delta_{\text{def.sat}} = P_{\text{sat}} - P \quad (6)$$

Segundo Kalamees e Vinha [17], o *MRY* pode ser definido através do déficit de saturação calculado apenas para os meses de inverno, meses esses mais críticos devido às baixas temperaturas que contribuem para um menor valor do déficit. Assim, é possível classificar os anos de acordo com duas tipologias distintas.

Após a aplicação do método, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 11, referentes aos anos da série analisada. Sombreados os três primeiros valores por ordem crescente, do vermelho para o amarelo, correspondendo a situação mais crítica ao menor valor do déficit de saturação (células a vermelho), é possível verificar que os anos candidatos são 2013, 2014, 2015 e 2016. Para melhor se compreender o comportamento deste parâmetro ao longo do ano, apresenta-se nas Figura 26, Figura 27, Figura 28 e Figura 29, a variação do déficit de saturação ao longo do tempo para os anos candidatos.

Tabela 11 – Resultados do déficit de saturação [Pa]

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
$\Delta_{\text{def.sat}}$ (anual)	638,114	659,192	668,411	543,663	583,951	488,021	510,645	521,441
$\Delta_{\text{def.sat}}$ (meses de inverno)	367,044	310,268	326,761	343,499	254,729	197,869	270,460	262,321

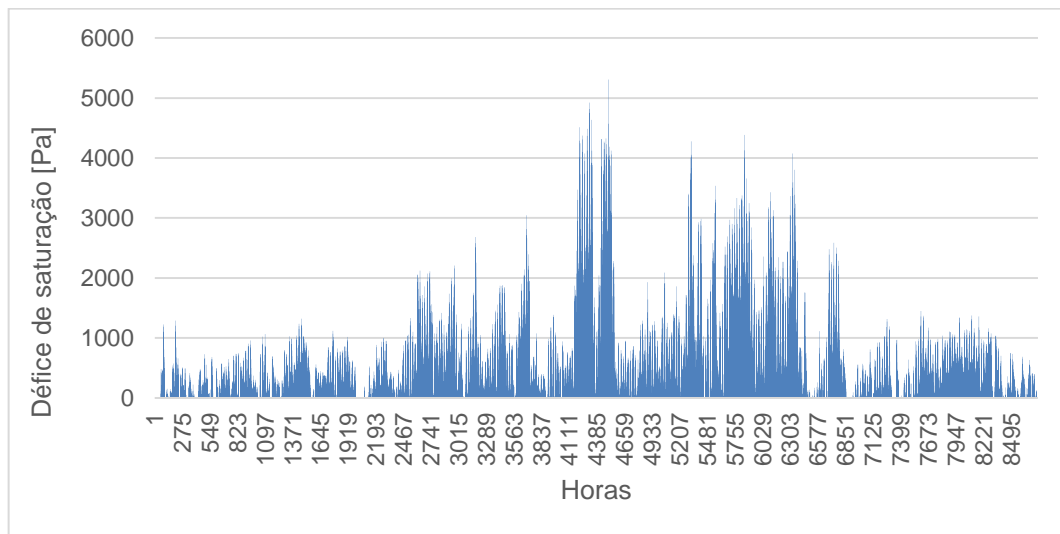


Figura 26 – Valores do déficit de saturação [Pa] ao longo do ano 2013

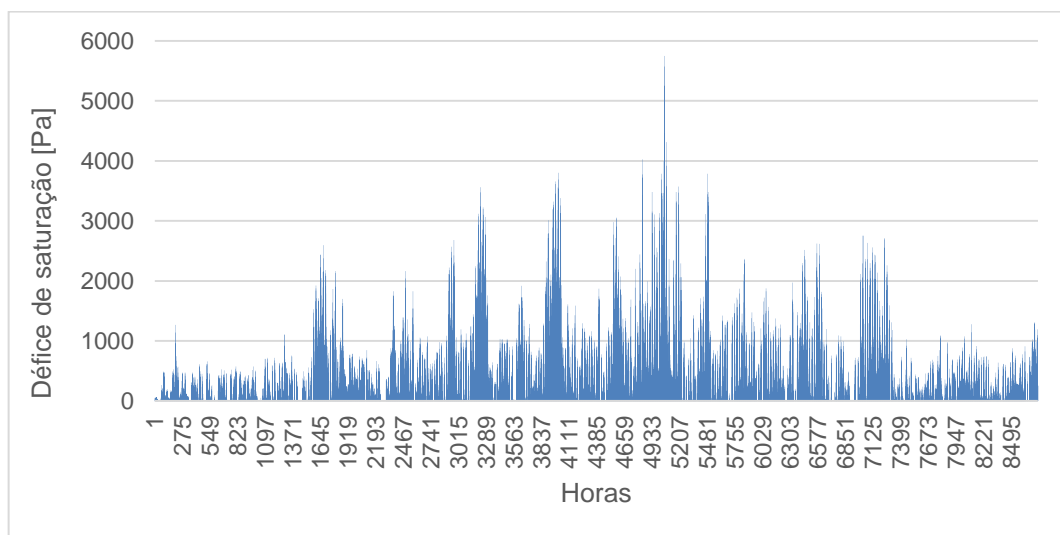


Figura 27 – Valores do déficit de saturação [Pa] ao longo do ano 2014

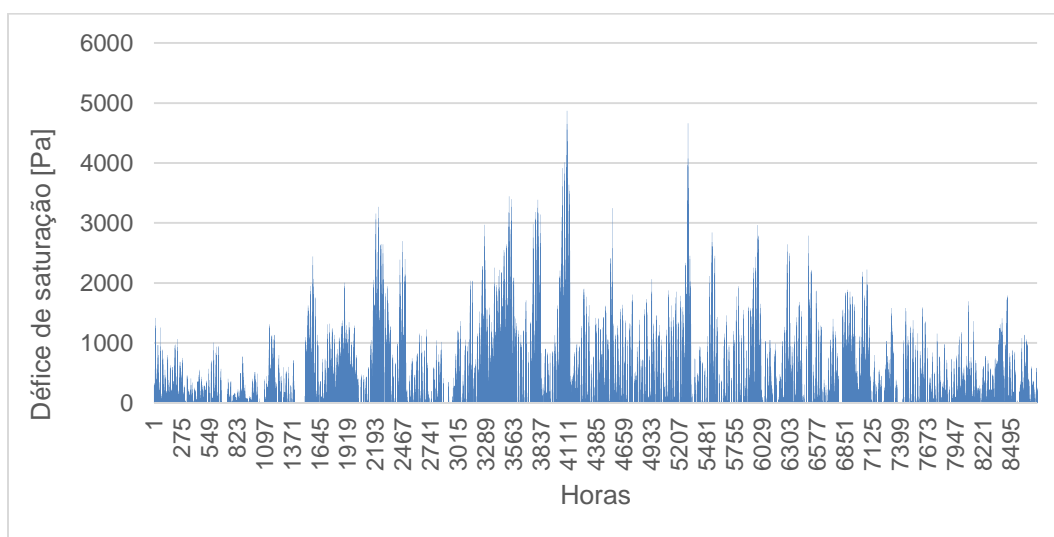


Figura 28 – Valores do déficit de saturação [Pa] ao longo do ano 2015

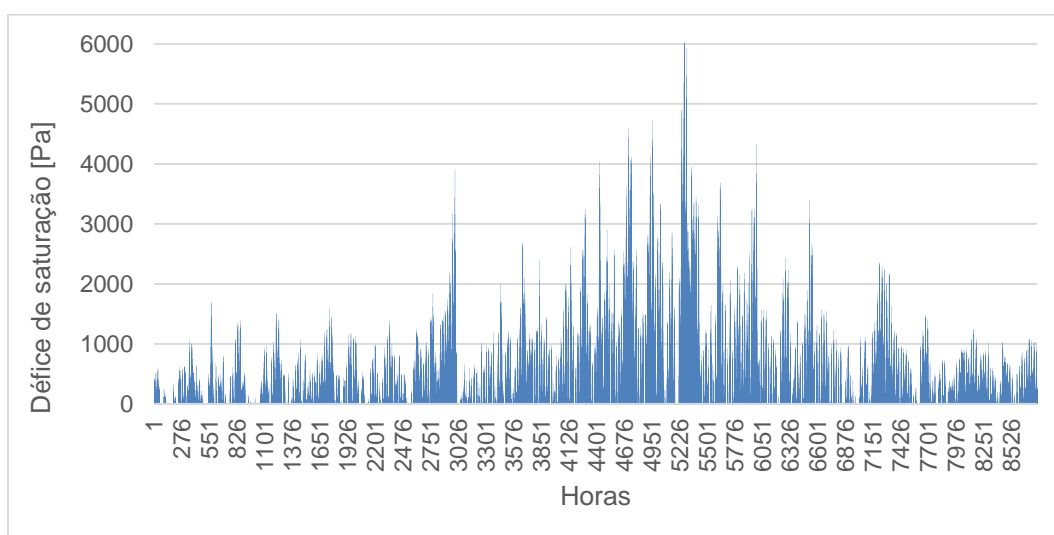


Figura 29 – Valores do déficit de saturação [Pa] ao longo do ano 2016

É possível observar que os valores mais elevados do déficit de saturação ocorrem no período correspondente aos meses de verão, onde as temperaturas são mais elevadas e a humidade relativa é mais baixa, potenciando desta forma a secagem dos elementos construtivos, após a acumulação de humidade proveniente dos meses mais críticos. Note-se que, ao ser avaliado este método utilizando apenas os meses de inverno, não se está a contabilizar o fator anteriormente referido, contribuindo desta forma para uma escolha mais segura e assertiva, tendo em conta que o principal objetivo é analisar e evitar riscos de acumulação de humidade, nos elementos construtivos que constituem a envolvente de um edifício. Assim, os períodos de verão, em que os valores do déficit de saturação são mais elevados, não influenciam na determinação do ano mais gravoso, contemplando-se apenas o período mais crítico no que respeita a riscos de acumulação de humidade (meses de inverno), apesar de esta metodologia se aproximar menos das condições reais.

Apesar de, na escolha dos anos candidatos, o primeiro e o terceiro ano mais críticos serem coincidentes nas duas tipologias deste método, tal facto não foi observável para os restantes anos da série, não se podendo afirmar que existe uma relação forte entre elas, apontando, desta forma, para um peso significativo dos meses de verão nos resultados.

4.2.2. MOISTURE INDEX

Por outro lado, o método de Cornick *et al.* [34], à semelhança do método combinado, considera não só o potencial de secagem mas também o potencial de humedificação, sendo necessário definir dois índices. Assim, o *Wetting Index (WI)* pode ser obtido de uma forma simplificada, pela precipitação média anual. Outra das formas existentes para a determinação deste índice é através do cálculo do *Wind Driven Rain Load (WDR)*, referido no capítulo 2. Por sua vez, o cálculo do *Drying Index (DI)* é semelhante ao do défice de saturação. Posteriormente, é feita a normalização dos dois índices, uma vez que estes possuem unidades diferentes. Após a sua normalização, é calculado o *Moisture Index* e selecionado o *MRY* mais gravoso de acordo com o maior valor do *MI*.

Na elaboração deste trabalho, o *WI* foi calculado pelo *WDR*, definido de acordo com a *ASHRAE Standard 160 (4.6)* [45]:

$$WI = WDR = F_E * F_D * F_L * U_{10} * \cos(\theta) * r_h \quad (7)$$

em que:

- *WDR* – Chuva incidente numa parede vertical [kg/(m².h)];
- *F_E* – Fator de exposição à chuva (Tabela 12);
- *F_D* – Fator de deposição da chuva (Tabela 13);
- *F_L* – Constante empírica - 0,2 [(kg.s)/(m³.mm)];
- *U₁₀* – Velocidade média horária do vento, a 10 metros de altura [m/s];
- *θ* – Ângulo entre a normal da parede e a direção do vento (Figura 30);
- *r_h* – Intensidade de precipitação, numa superfície horizontal [mm/h].

Tabela 12 – Valores do fator de exposição à chuva [45]

Altura do edifício [m]	Tipo de exposição devido ao terreno		
	Severa	Média	Abrigada
< 10	1,3	1,0	0,7
10 - 15	1,3	1,1	0,8
15 - 20	1,4	1,2	0,9
20 - 30	1,5	1,3	1,1
30 - 40	1,5	1,4	1,2
40 - 50	1,5	1,5	1,3
> 50	1,5	1,5	1,5

As exposições severas correspondem a colinas, áreas costeiras e zonas ventosas enquanto as abrigadas se referem a zonas protegidas por árvores, edifícios próximos ou localizadas em vales.

Tabela 13 – Valores do fator de deposição da chuva [45]

Tipo de deposição em função do tipo de cobertura	
Parede sob uma cobertura inclinada	0,35
Parede sob uma cobertura de pequena inclinação	0,5
Parede sujeita ao escoamento da chuva	1,0

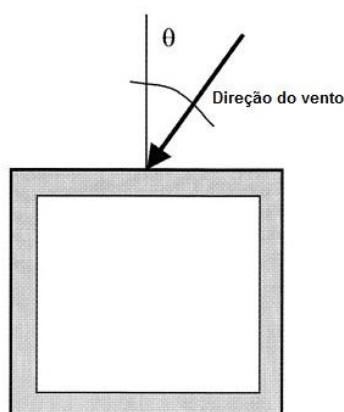


Figura 30 – Ângulo entre a normal da parede e a direção do vento [45]

Na determinação do *WDR* foram considerados fatores de exposição e deposição intermédios. Assim, foi considerado um edifício de altura entre os 10 e 15 metros e com uma exposição média, tendo em conta o tipo de terreno (F_E igual a 1,1). Para o fator de deposição (F_D), assumiu-se o valor de 0,5, referente a uma parede situada sob uma cobertura de pequena inclinação. Quanto à orientação da parede, definiu-se uma parede orientada a sul, à semelhança do que foi efetuado por Sousa [58].

Por sua vez, o *Drying Index* (*DI*) foi determinado de acordo com o descrito no método anterior, correspondendo ao défice de saturação. Para o efeito, foram utilizados os valores previamente calculados na aplicação deste método. A normalização dos índices foi efetuada utilizando a Equação 8.

$$I_{\text{normalizado}} = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (8)$$

Onde I representa o *WI* ou o *DI*, sendo que o I_{\min} e I_{\max} representam respetivamente o valor mínimo e o valor máximo dos respetivos índices, ao longo da série de dados considerada. Por fim, o *Moisture Index* é obtido de acordo com a Equação 9:

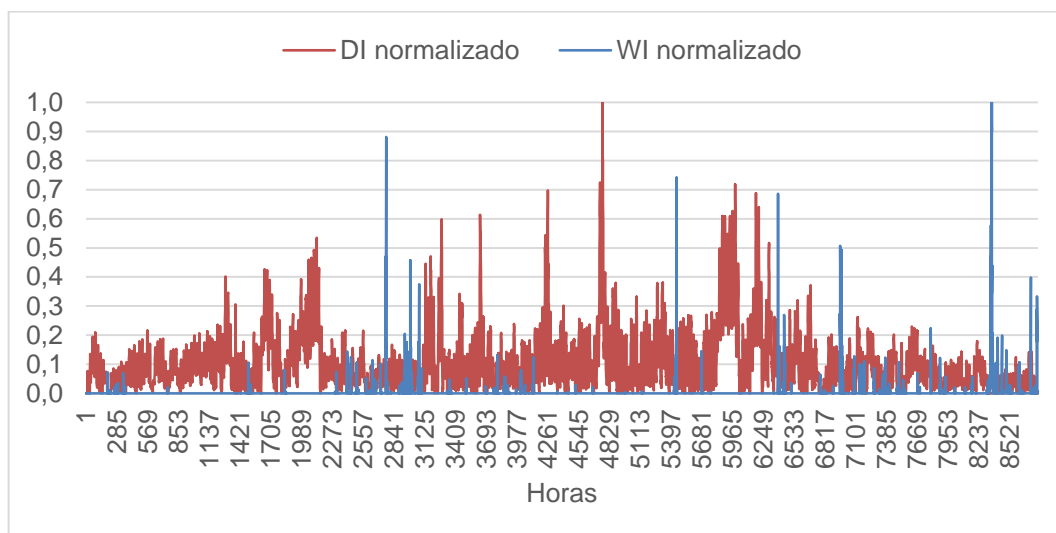
$$MI = \sqrt{WI_{\text{normalizado}}^2 + (1 - DI_{\text{normalizado}})^2} \quad (9)$$

Note-se que para o cálculo dos valores do *MI*, foram determinados os valores horários de *WI* e de *DI*, utilizando os dados meteorológicos horários da amostra em estudo, e posteriormente feita a sua normalização segundo os valores horários. Desta forma, obtiveram-se os valores horários do *MI*, sendo que o valor final deste índice corresponde à média dos valores horários, referentes ao período de tempo em análise. A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 14 – Resultados do *Moisture Index* [-]

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<i>MI</i>	0,867	0,879	0,857	0,908	0,891	0,916	0,896	0,921

Foram sombreados os três valores mais críticos por ordem decrescente do valor do *MI* (do vermelho para o amarelo), uma vez que o ano mais crítico corresponde ao ano com o maior valor de *MI*. Assim, verificou-se que os anos candidatos foram 2012, 2014 e 2016. As figuras seguintes (Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35 e Figura 36) ilustram a variação do *DI*, *WI* e *MI* ao longo do tempo, para os anos candidatos.

Figura 31 – Valores de *DI* e *WI* normalizados ao longo do ano 2012

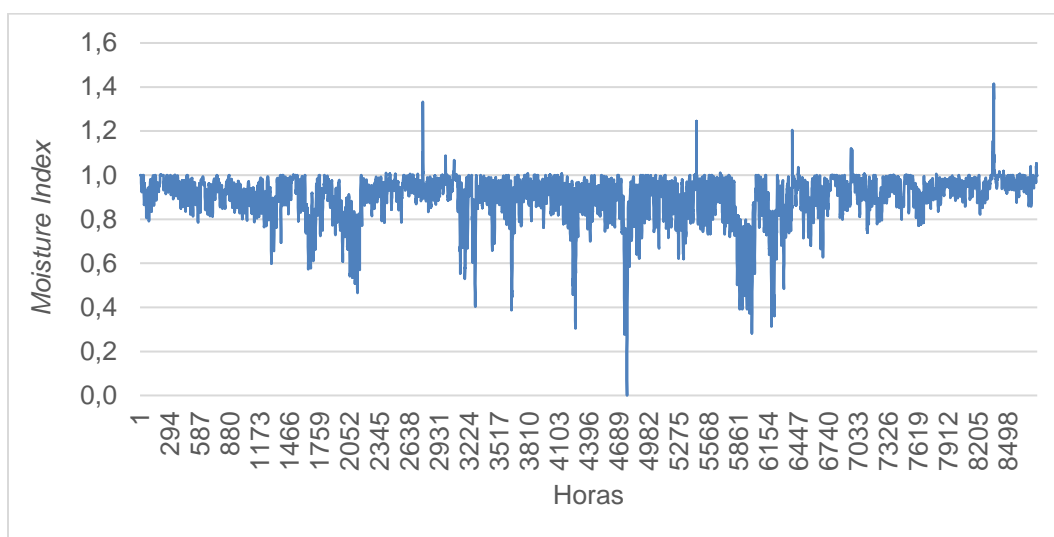


Figura 32 – Valores do *Moisture Index* ao longo do ano 2012

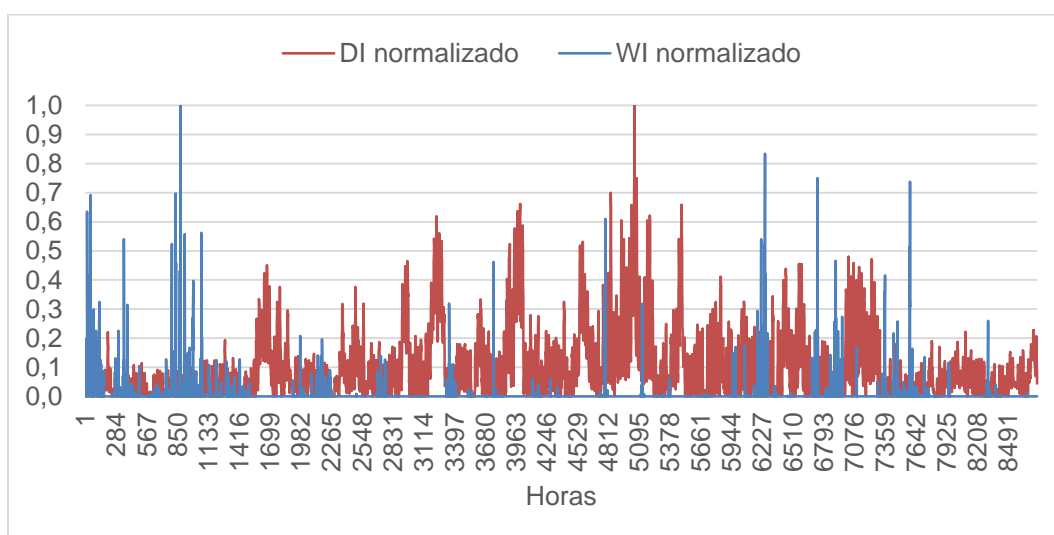


Figura 33 – Valores de *DI* e *WI* normalizados ao longo do ano 2014

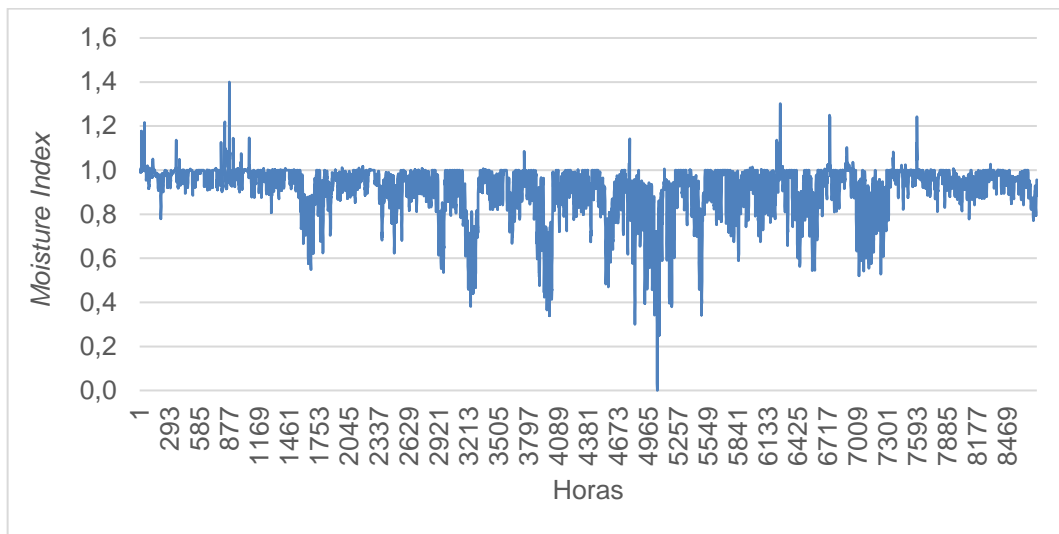


Figura 34 – Valores do *Moisture Index* ao longo do ano 2014

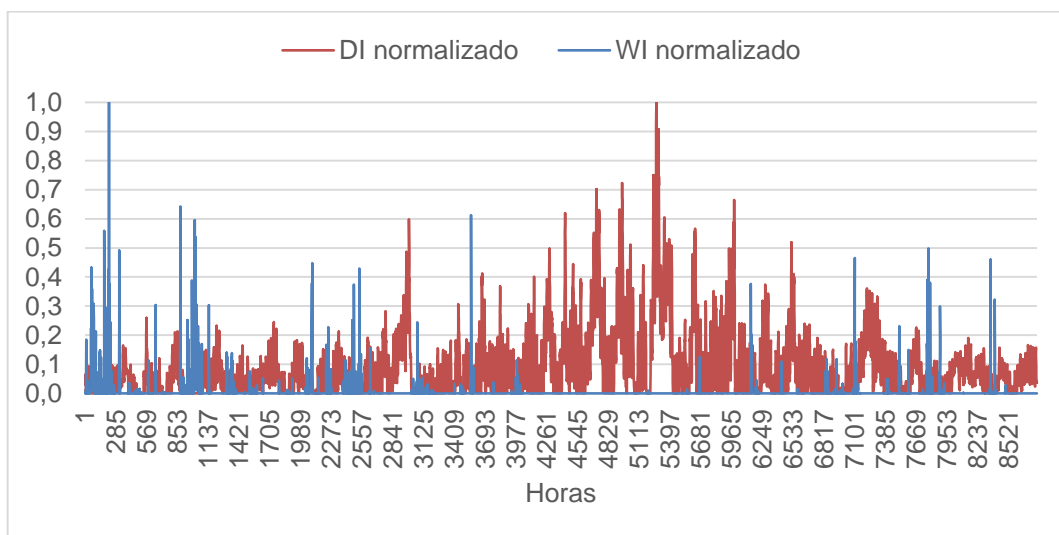


Figura 35 – Valores de *DI* e *WI* normalizados ao longo do ano 2016

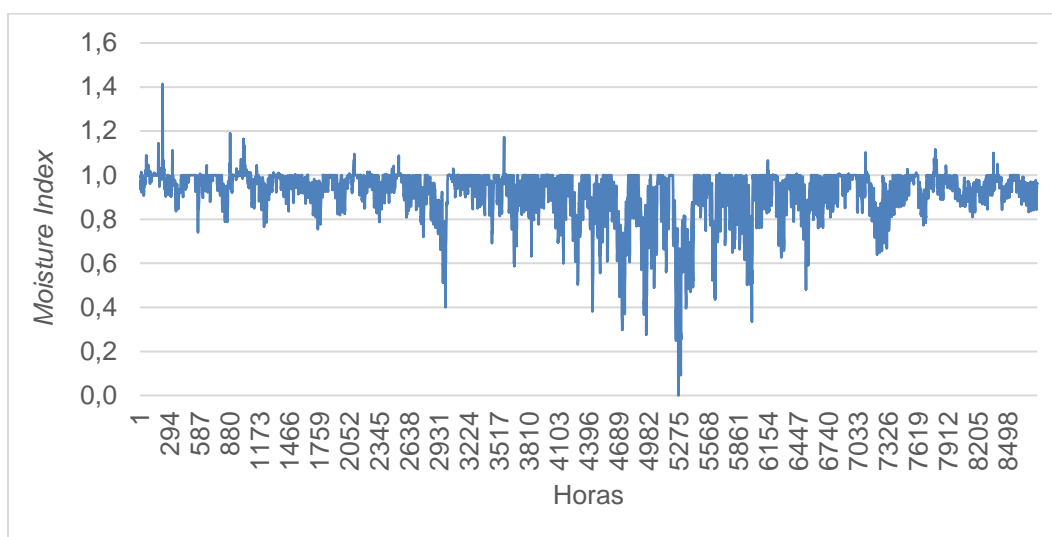


Figura 36 – Valores do *Moisture Index* ao longo do ano 2016

Através da análise da Figura 31, Figura 33 e Figura 35, é visível a discrepância entre os picos de valores correspondentes aos parâmetros “*DI* normalizado” e “*WI* normalizado”. Esta deve-se ao facto do parâmetro “*DI* normalizado” ser obtido pelas diferenças horárias entre a pressão de saturação do ar e a pressão de vapor do ar, sendo que os maiores valores dessas diferenças ocorrem no período de verão, onde as temperaturas são mais elevadas e a humidade relativa é mais baixa, enquanto para o parâmetro “*WI* normalizado”, obtido através dos valores do índice de chuva incidente (*WDR*), os picos de valores ocorrem mais frequentemente no período de inverno, onde as temperaturas são mais baixas e a humidade relativa mais alta.

Quanto ao *Moisture Index* (Figura 32, Figura 34 e Figura 36) os menores valores são obtidos durante o período de verão, o que era espectável, embora também ocorram picos da mesma ordem de grandeza ao longo do restante ano.

4.2.3. CLIMATIC INDEX

A metodologia proposta por Zhou *et al.* [15], à semelhança do método anterior, considera tanto o potencial de secagem como o potencial de humedificação. No entanto, no método anterior o potencial de secagem era dado pelas diferenças entre a pressão de saturação e a pressão de vapor do ar, neste método é abordada uma metodologia mais complexa para a sua determinação, englobando outros parâmetros meteorológicos como a radiação solar global, radiação atmosférica, pressão atmosférica e a velocidade do vento. Pretende-se, considerando esta abordagem, testar uma metodologia que se aproxime mais da realidade. Para o efeito, foi utilizado o método de Penman [57] que estima o potencial de evaporação ou evapotranspiração (E_{pen}), baseando-se na combinação entre o balanço de energia necessária para o processo de evaporação e as respetivas condições de transporte e evaporação. Assim, foi necessário definir alguns fatores como o declive da curva de pressão do vapor de água (Δ), a constante psicrométrica (γ), o calor latente de vaporização (λ') e a função do vento (f_u). Para o cálculo destes fatores, foram necessários dados dos seguintes parâmetros meteorológicos:

- Temperatura [°C];
- Humidade relativa [-];

- Pressão atmosférica [kPa];
- Radiação atmosférica [MJ/(m².h)];
- Radiação solar global [MJ/(m².h)];
- Velocidade do vento [m/s].

É importante realçar que existem várias versões da formulação original, sendo que a utilizada neste trabalho foi a seguinte:

$$E_{pen} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * \frac{R_n}{\lambda'} + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} * \frac{6,43 * f_u * \Delta_{def.sat}}{\lambda'} \quad (10)$$

O declive da curva de pressão do vapor de água (Δ em kPa/°C) é dado pela seguinte expressão:

$$\Delta = \frac{4098 * P_{sat}}{(T + 237,3)^2} \quad (11)$$

com a pressão de saturação (P_{sat}), em kPa, sendo este parâmetro obtido pela Equação 4 e a temperatura (T) em °C.

Em relação ao calor latente de vaporização (λ), foi calculado através da equação seguinte:

$$\lambda' = 2,501 - 2,361 * 10^{-3} * T \quad (12)$$

No que respeita à constante psicrométrica (γ), esta foi definida pela Equação 13.

$$\gamma = 0,0016286 * \frac{P_{atm}}{\lambda'} \quad (13)$$

sendo a pressão atmosférica (P_{atm}) medida em kPa.

Quanto à parcela da radiação (R_n), esta é definida de acordo com a seguinte equação:

$$R_n = R_{nS} - R_{nL} \quad (14)$$

em que o parâmetro R_{nS} é calculado pela seguinte forma:

$$R_{nS} = R_s * (1 - \alpha) \quad (15)$$

sendo a radiação solar global (R_s) em MJ/(m².h) e o valor do albedo (α) assumido como 0,2, referente a solo sem vegetação.

Por sua vez, o parâmetro R_{nL} , foi calculado de acordo com a Equação 16, diferindo do método de Penman [57]. Esta simplificação deveu-se ao facto de a radiação atmosférica ser conhecida, uma vez que o método proposto, pressupõe uma estimativa de cálculo para este parâmetro.

$$R_{nL} = R_{atm} * \varepsilon' \quad (16)$$

em que a radiação atmosférica (R_{atm}) é em MJ/(m².h) e a emissividade entre a atmosfera e o solo (ε'), obtida através da seguinte expressão:

$$\varepsilon' = 0,34 - 0,14 * \sqrt{P} \quad (17)$$

Por outro lado, a função do vento (f_u) foi determinada de acordo com a seguinte fórmula:

$$f_u = a_u + b_u * U_2 \quad (18)$$

sendo a_u e b_u , coeficientes em função do vento cujos valores são 1 e 0,536, respetivamente, e a velocidade do vento em m/s, a 2 metros de altura (U_2), calculada pela Equação 19 [64]:

$$U_2 = U_z * \frac{4,87}{\ln(67,8 * Z - 5,42)} \quad (19)$$

em que Z é a altura, em metros, em que foi medida a velocidade do vento e U_z a respetiva velocidade à altura referida.

Quanto ao déficit de saturação ($\Delta_{\text{def.sat}}$), este foi calculado de acordo com a Equação 6, sendo as unidades utilizadas, neste caso, kPa.

Contudo, para obtenção do valor referente ao potencial de evaporação (E_{pen}) anual, foi necessário determinar as médias diárias, através dos valores horários, uma vez que os valores utilizados referentes aos parâmetros meteorológicos da amostra em estudo foram valores horários e posteriormente calculado o valor anual, pela soma dos valores diários obtidos anteriormente.

Quanto ao potencial de humedificação utilizado neste método foi calculado através do índice de chuva incidente (WDR), tal como no MI . A partir dos valores horários do WDR foi determinado o valor anual através da soma dos valores horários, para cada ano da amostra em estudo.

Por fim, foi determinado o *Climatic Index* através do quociente entre o valor anual do índice de chuva incidente (WDR) e o valor anual do potencial de evaporação (E_{pen}), para cada ano da série de dados em análise.

$$CI = \frac{WDR_{\text{anual}}}{E_{\text{pen}_{\text{anual}}}} \quad (20)$$

Portanto, quanto maior for o valor do *Climatic Index*, maior são os riscos de humidade nos elementos construtivos que constituem a envolvente do edifício. Em suma, foram obtidos os valores de CI , referentes aos vários anos da série de dados em análise, apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados do *Climatic Index* [-]

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
CI	0,810	1,057	0,458	0,631	1,207	1,575	0,837	1,412

Após a análise da Tabela 15, foram sombreados os três valores mais críticos, por ordem decrescente (do vermelho para o amarelo), correspondendo o ano mais crítico ao com o maior valor de CI . Assim, de acordo com esta metodologia, os anos candidatos a *MRY* foram: 2013, 2014 e 2016. As figuras seguintes (Figura 37, Figura 38 e Figura 39) mostram a variação horária da chuva incidente (WDR) e do potencial de evaporação (E_{pen}), para os anos mais críticos.

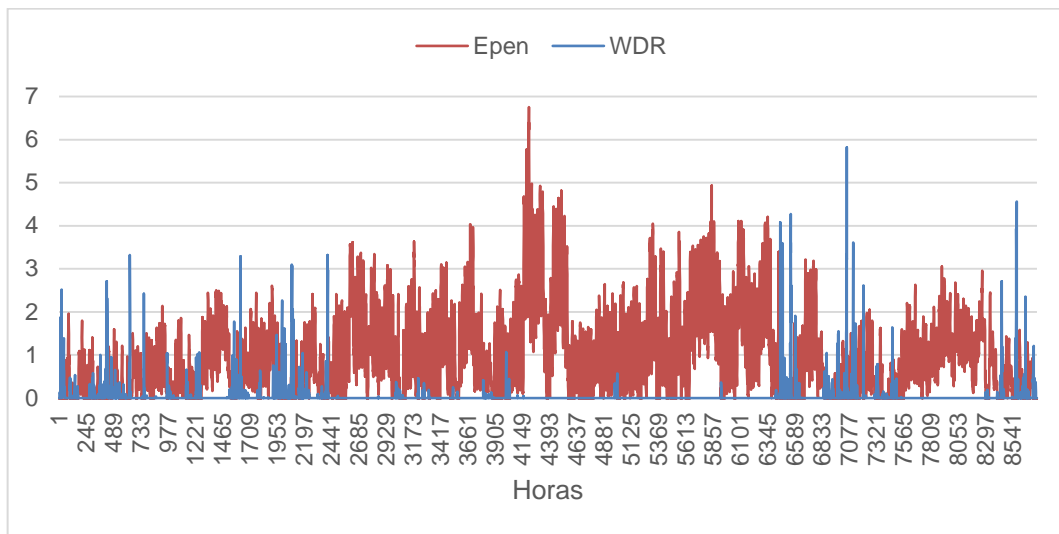


Figura 37 – Valores de *Epen* e do índice *WDR* ao longo do ano 2013

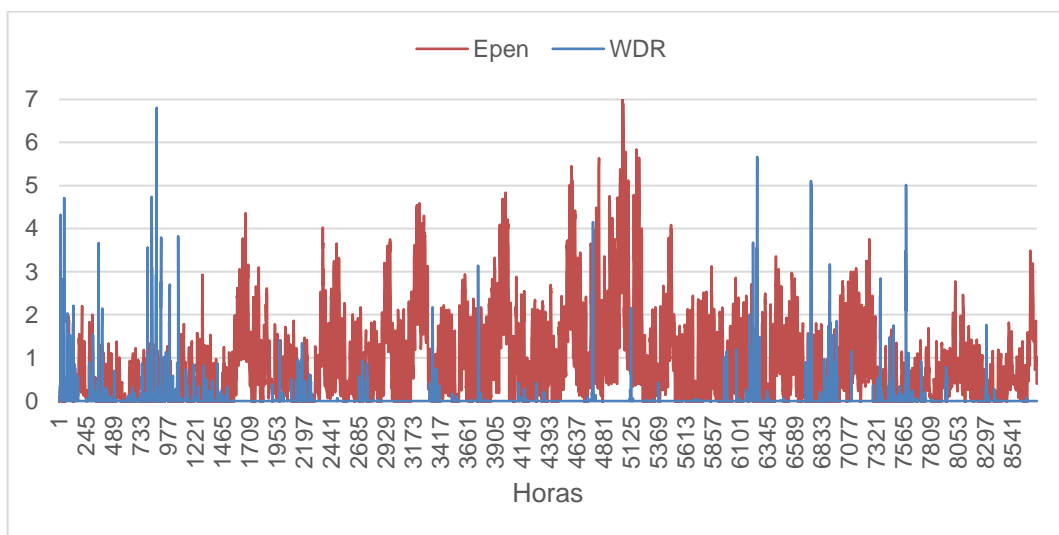
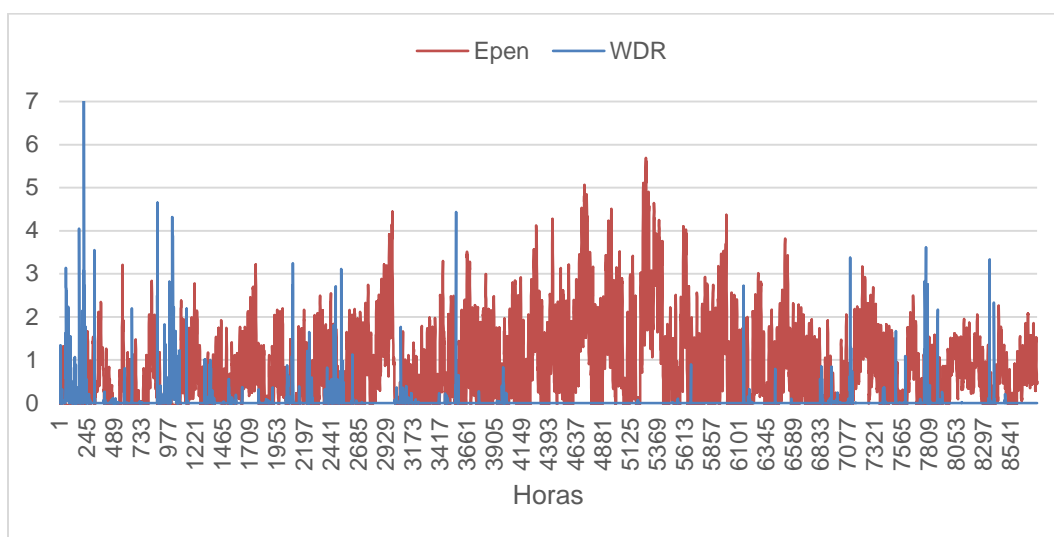


Figura 38 – Valores de *Epen* e do índice *WDR* ao longo do ano 2014

Figura 39 – Valores de E_{pen} e do índice WDR ao longo do ano 2016

É notória a maior quantidade de chuva incidente (WDR) ao longo do ano 2014 (ano mais crítico), comparativamente com os anos 2013 e 2016, o que influencia significativamente o valor de CI . Quanto ao ano 2016, é visível a tendência de valores mais baixos do parâmetro E_{pen} em relação aos outros anos, o que, em simultâneo com a frequência de picos do índice de chuva incidente (WDR), resulta no segundo ano mais crítico.

4.3. SELEÇÃO DOS ANOS CLIMÁTICOS DE REFERÊNCIA

Após a aplicação das três metodologias selecionadas para a determinação dos anos climáticos de referência candidatos a *Moisture Reference Year*, foi necessário analisar os resultados provenientes dos vários métodos e determinar os anos mais gravosos.

Desta forma, foi criada uma tabela resumo (Tabela 16), com os valores dos resultados dos diferentes métodos utilizados, para todos os anos da série de dados analisada. As células referentes aos três anos mais gravosos, obtidos a partir de cada uma das metodologias, foram sombreadas com cores, sendo que os três anos mais críticos, estão assinaladas a vermelho, laranja e amarelo.

Tabela 16 – Resultados das várias metodologias

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
$\Delta_{\text{def.sat}}$ (anual)	638,114	659,192	668,411	543,663	583,951	488,021	510,645	521,441
$\Delta_{\text{def.sat}}$ (meses de inverno)	367,044	310,268	326,761	343,499	254,729	197,869	270,460	262,321
MI	0,867	0,879	0,857	0,908	0,891	0,916	0,896	0,921
CI	0,810	1,057	0,458	0,631	1,207	1,575	0,837	1,412

Com base na análise da Tabela 16, é possível verificar que para a primeira alternativa do primeiro método (défice de saturação anual) os anos candidatos a *MRY* foram: 2014, 2015 e 2016. Quanto à segunda alternativa (défice de saturação nos meses de inverno), diferiu apenas num ano, tendo-se obtido

os anos 2013, 2014 e 2016 como os três anos mais críticos. É importante referir que este método é apenas baseado no potencial de secagem, enquanto os mais complexos se baseiam tanto no potencial de secagem como no potencial de humidificação.

Em relação ao método do *Moisture Index*, os anos candidatos a *MRY* foram: 2012, 2014 e 2016. De acordo com esta metodologia, o ano 2016 foi o ano considerado mais crítico, seguindo-se 2014 e posteriormente 2012, sendo que 2012 não foi assinalado em nenhum dos restantes métodos, como pertencente aos 3 primeiros anos mais críticos.

Por último, através da análise dos resultados do *Climatic Index* verificou-se que, apesar de em ordem inversa (à exceção do ano mais crítico), à semelhança do défice de saturação para os meses de inverno, este assinalou os anos 2013, 2014 e 2016 como sendo os anos mais críticos.

Com base nos resultados obtidos, foi possível observar que os vários métodos são de certo modo concordantes, verificando-se que 2014 e 2016 foram os anos mais críticos da série, tendo sido sinalizados em todos os métodos, como pertencentes aos três anos mais graves, no que respeita aos riscos de acumulação de humidade.

Portanto, o ano 2014 surgiu duas vezes em primeira posição e uma vez em segunda, enquanto 2016 surgiu uma vez em primeira posição, uma vez em segunda e uma vez em terceira, tendo ambos os anos obtido a mesma classificação nas duas versões do primeiro método ($\Delta_{\text{def.sat}}$), o que nos indica que estes foram fortemente influenciados pelo período de inverno, como se pode verificar através da análise dos valores referentes a esse período nas seguintes figuras: Figura 27, Figura 29, Figura 33, Figura 35, Figura 38 e Figura 39.

Contudo, poderá afirmar-se que o ano 2014 foi o mais grave, apesar de no método do *Moisture Index*, ter sido classificado na segunda posição, sendo, apesar disso, a diferença entre o pior e o segundo pior ano de apenas 0,05. Desta forma, poderá considerar-se o ano 2014 como o *Moisture Reference Year*, para a cidade do Porto, obtido com base nos dados fornecidos pela estação meteorológica do LFC/FEUP. É importante referir que a série de dados utilizada neste trabalho é relativamente pequena, podendo este resultado alterar-se se se considerar um maior número de dados. Desta forma, será de todo o interesse no futuro, utilizar-se amostras de maiores dimensões para obtenção de conclusões mais fiáveis.

As figuras seguintes (Figura 40, Figura 41, Figura 42, Figura 43, Figura 44, Figura 45, Figura 46 e Figura 47) representam a variação horária anual dos diversos parâmetros meteorológicos do *Moisture Reference Year*, da cidade do Porto.

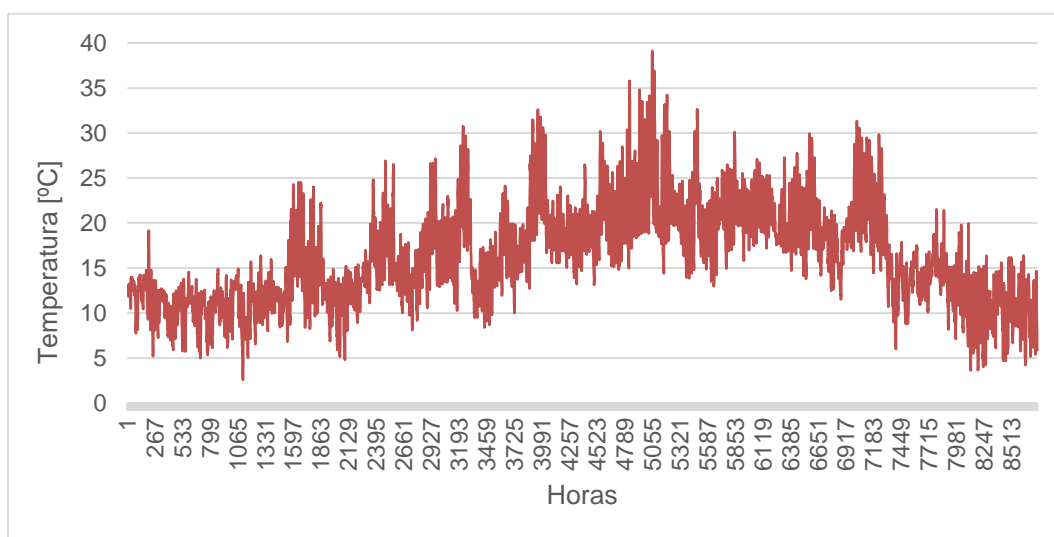


Figura 40 – Valores da temperatura [°C] ao longo do ano 2014 (MRY)

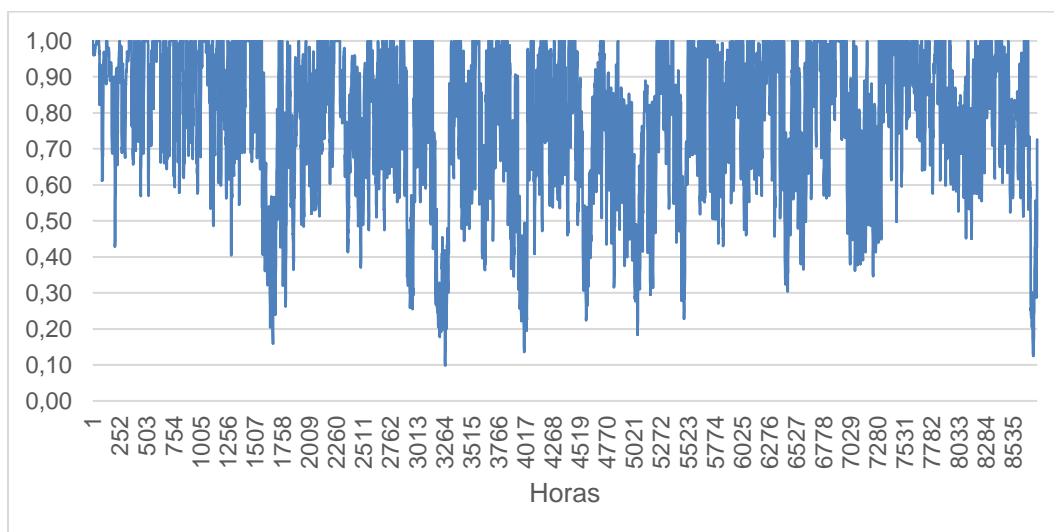


Figura 41 – Valores da humidade relativa [-] ao longo do ano 2014 (MRY)

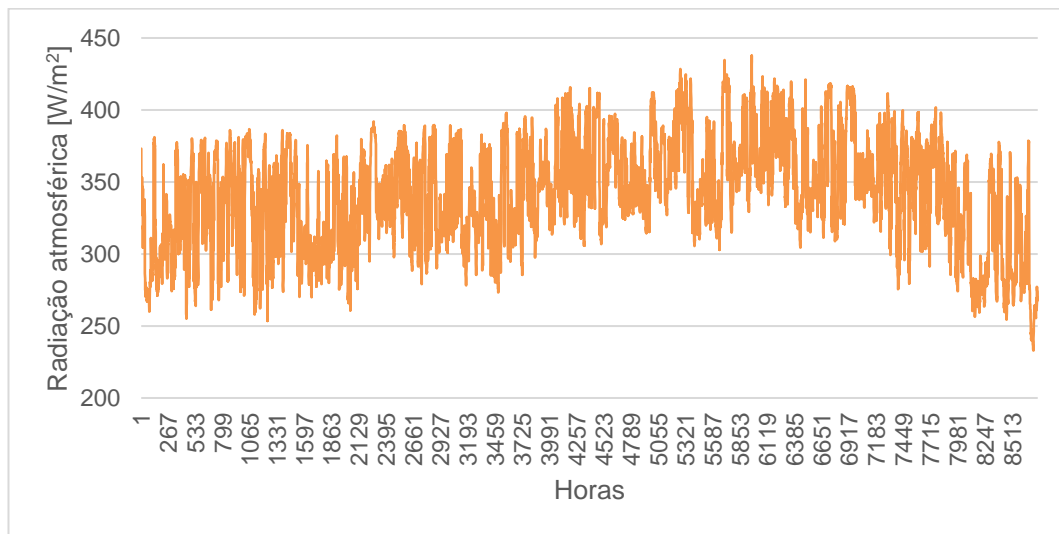


Figura 42 – Valores da radiação atmosférica [W/m^2] ao longo do ano 2014 (MRY)

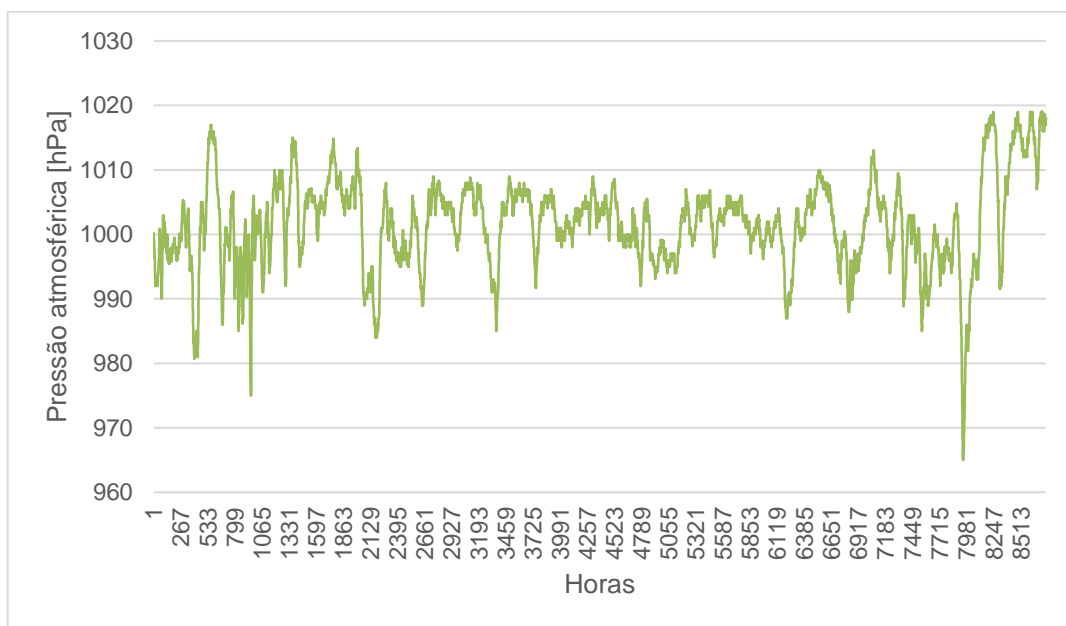


Figura 43 – Valores da pressão atmosférica [hPa] ao longo do ano 2014 (MRY)

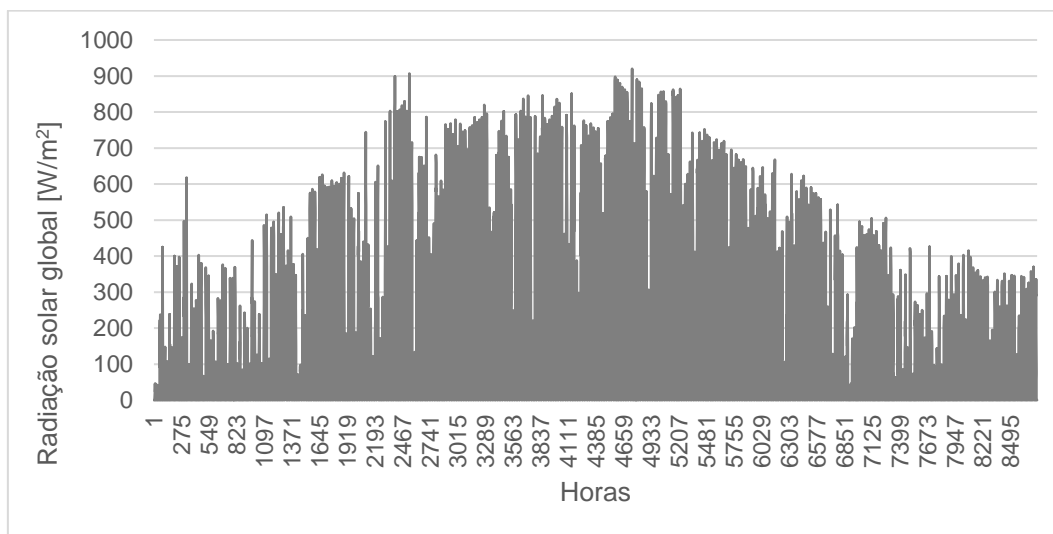


Figura 44 – Valores da radiação solar global [W/m^2] ao longo do ano 2014 (MRY)

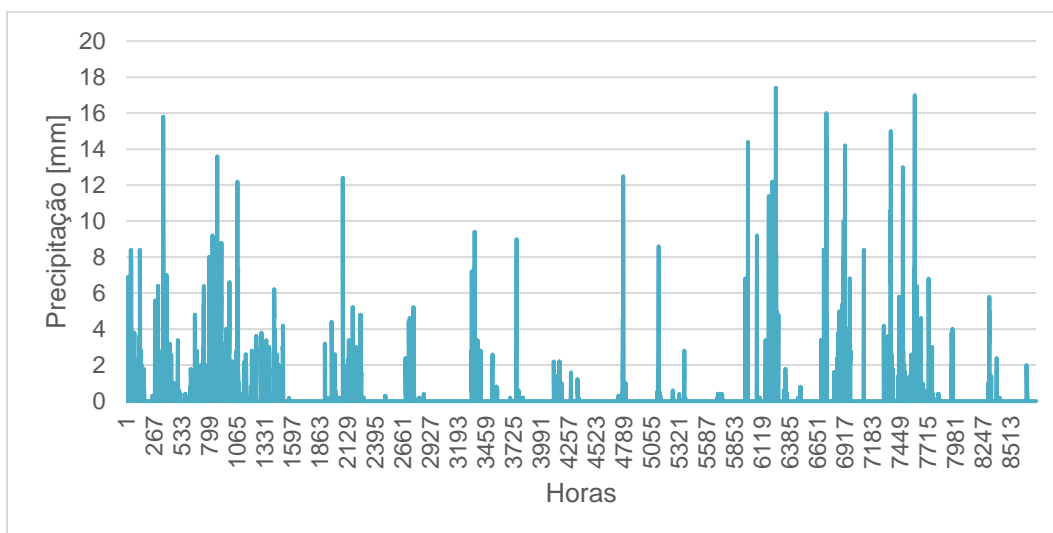


Figura 45 – Valores da precipitação [mm] ao longo do ano 2014 (MRY)

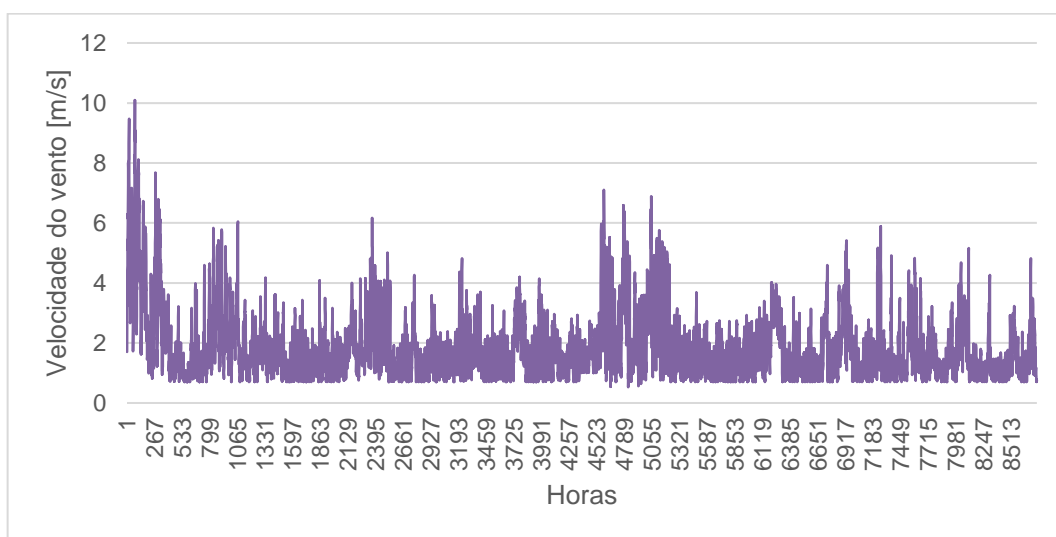


Figura 46 – Valores da velocidade do vento [m/s] ao longo do ano 2014 (MRY)

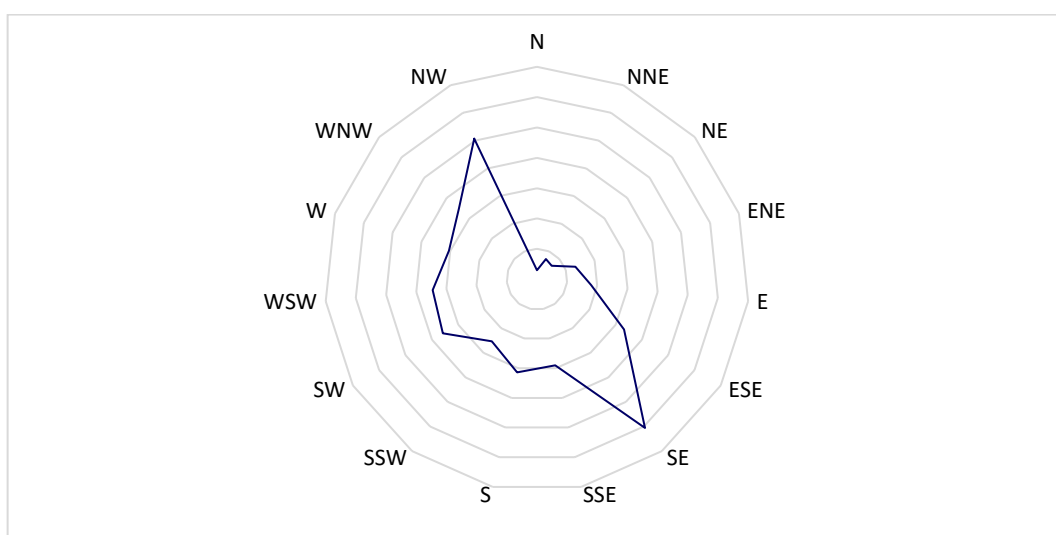


Figura 47 – Predominância da direção do vento ao longo do ano 2014 (MRY)

4.4. REFLEXÕES FINAIS

Após a definição dos parâmetros climáticos que foram utilizados na escolha do ano climático de referência, resta salientar que estes influenciam o cálculo do ano climático com um peso associado diferente. Tendo em conta os valores dos índices observados nas diversas metodologias abordadas, à exceção do primeiro método, que se baseia apenas no potencial de secagem, é possível afirmar que o peso associado ao potencial de humedificação (semelhante no segundo e terceiro métodos) é superior ao peso referente ao potencial de secagem abordado em cada um dos restantes métodos. Este facto deve-se à maior instabilidade do índice *WDR*, uma vez que depende de parâmetros como a direção do vento, velocidade do vento e precipitação, parâmetros cujas tendências são pouco previsíveis ao longo de todo o ano. Por outro lado, apesar de terem sido abordadas diferentes metodologias no cálculo do potencial de secagem, utilizado no segundo e terceiro métodos, este é um parâmetro de maior regularidade pois,

depende de variáveis climáticas como a temperatura, humidade relativa, pressão atmosférica e radiação atmosférica, variáveis cujas tendências são mais idênticas ao longo do ano, não influenciando, da mesma forma, os valores de *MI* e *CI* utilizados na determinação dos anos climáticos de referência.

Contudo, é interessante realçar que o ano definido como o *MRY* (2014) foi o ano com a maior percentagem total de falhas colmatadas, tendo correspondido a cerca de 25%, podendo este fator ter influenciado os resultados dos métodos abordados e consequentemente a escolha do *MRY*. É também importante denotar que, na maior parte das falhas colmatadas, foram utilizados dados de outras estações meteorológicas próximas, à exceção da radiação solar difusa (que não entra em nenhum dos processos de cálculo para determinação do *MRY*) e da radiação atmosférica, cuja colmatação foi feita através de médias estatísticas podendo influenciar, de certa forma, os resultados do *Climatic Index*. Uma vez que a percentagem de falhas colmatadas, referentes apenas à radiação atmosférica, foi cerca de 15% para o ano em questão, e tendo-se apenas utilizado este parâmetro no cálculo do potencial de evaporação (E_{pen}), é possível considerar que a influência deste parâmetro é pouco relevante, devido à maior estabilidade dos valores do E_{pen} verificada, ao longo do ano, em relação aos valores do índice *WDR*, utilizados na determinação do *CI*. Desta forma, pode-se considerar que as falhas colmatadas na série de dados utilizada, não tiveram uma influência significativa no processo de determinação do *MRY*, para a cidade do Porto.

Por fim, através da análise dos valores do índice de chuva incidente (*WDR*) ao longo do *MRY* (ano 2014), verificou-se que a orientação mais crítica de parede correspondeu a sudoeste, para a qual se obteve o maior valor anual do respetivo índice (cerca de 535,5 mm).

5

ANÁLISE DA SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA

5.1. PROGRAMA DE SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA (WUFI)

Em continuidade com o trabalho previamente elaborado, e no âmbito dos objetivos do mesmo, neste capítulo pretendeu-se avaliar o comportamento de alguns elementos construtivos através da utilização do programa de simulação higrotérmica *WUFI Pro 5.0*, fazendo variar as condições climáticas exteriores, a partir de dois anos climáticos de referência distintos. Para o efeito, foi utilizado o ano climático de referência determinado no presente trabalho (*Moisture Reference Year*) e o ano climático de referência para cálculos energéticos (*Test Reference Year*) elaborado por Sousa [58], segundo a norma europeia *EN ISO 15927-4* [30], respeitantes às condições climáticas existentes na cidade do Porto.

Desta forma, pretendeu-se estudar as divergências provenientes da utilização do *MRY* e do *TRY*, na simulação higrotérmica de três tipologias de parede distintas, assim como determinar a tipologia de parede cujo comportamento é o mais adequado, e cujo comportamento é o mais crítico. Para o efeito, foram avaliados os resultados das simulações, através da análise estatística, utilizando o auxílio do programa *IBM SPSS Statistics 24*.

Neste processo, foi necessário definir alguns parâmetros de entrada tais como a constituição do elemento construtivo, as condições iniciais de temperatura e humidade relativa, as condições de fronteira interiores e exteriores, a orientação do elemento construtivo, inclinação e os fatores de exposição e deposição da chuva, os coeficientes de transferência à superfície e o período de simulação. Assim, as três tipologias de parede definidas para a simulação higrotérmica foram:

- Parede simples com isolamento pelo interior;
- Parede simples com isolamento pelo exterior;
- Parede dupla com isolamento na caixa-de-ar.

Quanto ao primeiro elemento construtivo, foi definida uma parede simples de tijolo maciço, rebocada pelo exterior e com isolamento térmico aplicado pelo interior associado a placas de gesso cartonado, visível através da Figura 48. Quanto às especificações e propriedades dos elementos constituintes, estes são apresentados na Tabela 17.



Figura 48 – Configuração da parede simples com isolamento pelo interior

Tabela 17 – Propriedades da parede simples com isolamento pelo interior

Camada	Espessura [m]	Massa volúmica [kg/m ³]	Porosidade [m ³ /m ³]	Calor específico do material seco [J/(kg.K)]	Condutibilidade térmica do material seco [W/(m.K)]	Fator de resistência à difusão de vapor de água [-]
Reboco exterior	0,020	1900,0	0,24	850,0	0,80	25,0
Tijolo maciço	0,240	1900,0	0,24	850,0	0,60	10,0
Lã mineral	0,040	60,0	0,95	850,0	0,04	1,3
Placa de gesso cartonado	0,0125	850,0	0,65	850,0	0,20	8,3

Em relação à parede simples com isolamento pelo exterior, esta foi constituída de acordo com a Figura 49 e cujas especificações estão descritas na Tabela 18.



Figura 49 – Configuração da parede simples com isolamento pelo exterior

Tabela 18 – Propriedades da parede simples com isolamento pelo exterior

Camada	Espessura [m]	Massa volúmica [kg/m ³]	Porosidade [m ³ /m ³]	Calor específico do material seco [J/(kg.K)]	Condutibilidade térmica do material seco [W/(m.K)]	Fator de resistência à difusão de vapor de água [-]
Reboco exterior	0,005	1900,0	0,24	850,0	0,80	25,0
Lã mineral	0,040	60,0	0,95	850,0	0,04	1,3
Tijolo maciço	0,240	1900,0	0,24	850,0	0,60	10,0
Placa de gesso cartonado	0,0125	850,0	0,65	850,0	0,20	8,3

Por último, a parede dupla com isolamento a caixa-de-ar foi definida de acordo com a Figura 50, sendo as suas especificações e propriedades apresentadas na Tabela 19.



Figura 50 – Configuração da parede dupla com isolamento na caixa-de-ar

Tabela 19 – Propriedades da parede dupla com isolamento na caixa-de-ar

Camada	Espessura [m]	Massa volúmica [kg/m ³]	Porosidade [m ³ /m ³]	Calor específico do material seco [J/(kg.K)]	Condutibilidade térmica do material seco [W/(m.K)]	Fator de resistência à difusão de vapor de água [-]
Reboco exterior	0,020	1900,0	0,24	850,0	0,80	25,0
Tijolo maciço - exterior	0,150	1900,0	0,24	850,0	0,60	10,0
Caixa-de-ar	0,020	1,3	0,99	1000,0	0,13	0,56

Lã mineral	0,040	60,0	0,95	850,0	0,04	1,3
Tijolo maciço - interior	0,110	1900,0	0,24	850,0	0,60	10,0
Placa de gesso cartonado	0,0125	850,0	0,65	850,0	0,20	8,3

Posteriormente, foi definida a orientação do elemento construtivo a Sul, possuindo este uma inclinação de 90° em relação à horizontal, e cujos fatores de exposição e de deposição da chuva foram considerados 1,1 e 0,5, respetivamente, à semelhança do anteriormente definido na construção do *MRY*, aquando do cálculo do índice de chuva incidente, determinado pela *ASHRAE Standard 160* [45]. No que diz respeito aos coeficientes de transferência à superfície, foi considerada uma resistência térmica exterior dependente do vento, um coeficiente de absorção de onda curta de 0,4, uma emissividade de onda longa de 0,9, um coeficiente de refletividade do solo de onda curta de 0,2, um fator de redução da chuva incidente de 0,7 e uma resistência térmica interior de 0,125 (m².K)/W.

Como condição inicial, foi considerada uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa de 80%, tendo-se admitido um clima interior constante com uma temperatura de 20°C e humidade relativa de 60%. Por fim, foi definido um período de simulação de dois anos e introduzidos os ficheiros respetivos aos anos climáticos de referência em estudo para simular as condições climatéricas exteriores.

Para a análise de resultados, foi apenas utilizado o último ano da simulação, de forma a eliminar os efeitos das condições iniciais das simulações. O *MRY*, determinado neste trabalho, é composto por 8760 horas enquanto o *TRY*, determinado por Sousa [58], é composto por 7997 horas uma vez que a autora não colmatou a totalidade das falhas existentes nos dados climáticos.

Note-se que todos os dados de entrada, anteriormente referidos, foram os mesmos em todas as simulações uma vez que estas considerações foram as mesmas assumidas por Sousa [58], tendo-se apenas alterado a tipologia de parede a simular e o respetivo ano climático de referência.

Outra das análises elaboradas neste capítulo, que surge no seguimento do método do *Climatic Index*, consistiu na determinação dos valores do *Relative Humidity and Temperature Index (RHTI)*, para as três tipologias de parede e para os anos mais críticos assinalados de acordo com as três metodologias utilizadas na determinação do *MRY*.

5.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

5.2.1 PAREDE SIMPLES COM ISOLAMENTO PELO INTERIOR

Após a realização das simulações higrotérmicas, foram exportados os dados relativos à temperatura superficial exterior, à humidade relativa superficial exterior, aos teores de humidade das diversas camadas do elemento construtivo, em análise, e ao teor de humidade total. Posteriormente, foi feita uma análise estatística preliminar destes parâmetros, por recurso a ilustrações gráficas e medidas estatísticas descritivas. Essa análise está apresentada na Figura 51, Figura 52, Figura 53 e Figura 54 e na Tabela 20).

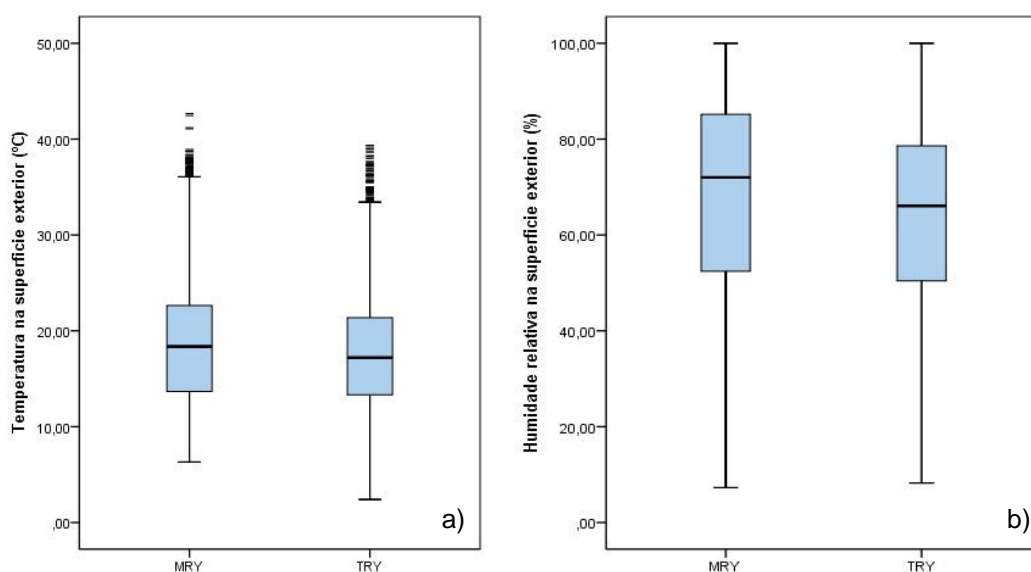


Figura 51 – *Boxplot* dos resultados da simulação para uma parede simples com isolamento pelo interior (MRY e TRY): a) temperatura na superfície exterior [°C], b) humidade relativa na superfície exterior [%]

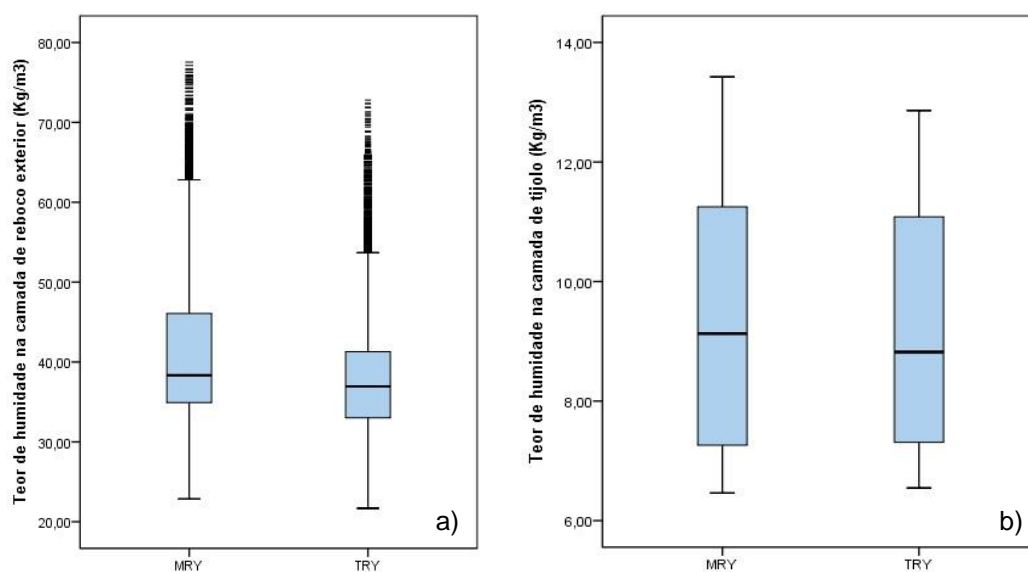


Figura 52 – *Boxplot* dos resultados da simulação para uma parede simples com isolamento pelo interior (MRY e TRY): a) teor de humidade na camada de reboco exterior [kg/m³], b) teor de humidade na camada de tijolo [kg/m³]

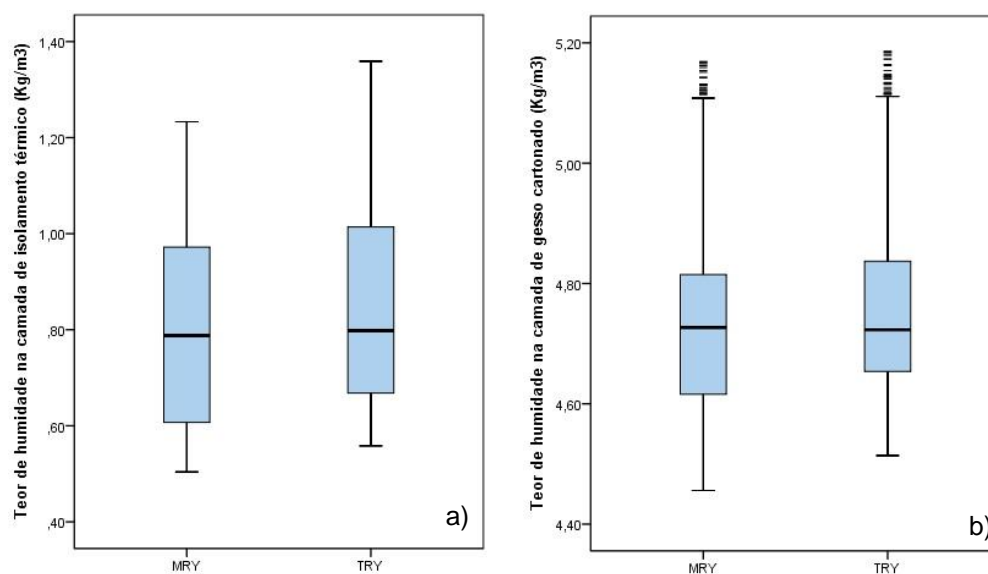


Figura 53 – *Boxplot* dos resultados da simulação para uma parede simples com isolamento pelo interior (MRV e TRY): a) teor de humidade na camada de isolamento térmico [kg/m³], b) teor de humidade na camada de gesso cartonado [kg/m³]

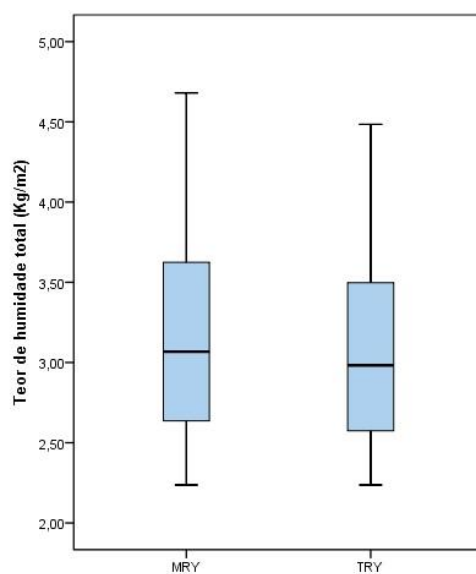


Figura 54 – *Boxplot* do teor de humidade total [kg/m²] de uma parede simples com isolamento pelo interior (MRV e TRY)

Tabela 20 – Medidas estatísticas descritivas dos resultados das simulações para as diversas camadas de uma parede simples com isolamento pelo interior (MRY e TRY)

Medidas Estatísticas	Temperatura na superfície exterior [°C]		Humidade relativa na superfície exterior [%]		Teor de humidade na camada de reboco exterior [kg/m³]	
	MRY	TRY	MRY	TRY	MRY	TRY
Média	18,797	17,653	68,851	64,299	41,222	38,064
Mediana	18,367	17,204	72,024	66,074	38,326	36,937
Variância	39,006	33,348	477,923	397,072	89,334	61,221
Desvio Padrão	6,246	5,775	21,861	19,927	9,452	7,824
Mínimo	6,316	2,401	7,272	8,231	22,865	21,688
Máximo	42,673	39,353	100,000	100,000	77,533	72,787
Assimetria	0,544	0,488	-0,378	-0,225	1,040	1,094
	Teor de humidade na camada de tijolo [kg/m³]		Teor de humidade na camada de isolamento térmico [kg/m³]		Teor de humidade na camada de gesso cartonado [kg/m³]	
	MRY	TRY	MRY	TRY	MRY	TRY
Média	9,314	9,253	0,801	0,854	4,722	4,746
Mediana	9,130	8,820	0,788	0,798	4,727	4,723
Variância	4,376	4,345	0,040	0,046	0,016	0,015
Desvio Padrão	2,092	2,085	0,199	0,214	0,128	0,124
Mínimo	6,463	6,548	0,504	0,558	4,456	4,514
Máximo	13,424	12,859	1,233	1,359	5,169	5,186
Assimetria	0,259	0,385	0,418	0,510	0,225	0,524
Teor de humidade total [kg/m²]						
	MRY	TRY				
Média	3,151	3,075				
Mediana	3,067	2,983				
Variância	0,356	0,315				
Desvio Padrão	0,596	0,561				
Mínimo	2,237	2,237				
Máximo	4,680	4,485				
Assimetria	0,450	0,450				

Depois da análise previamente efetuada, verificou-se que os valores das medidas estatísticas referentes à temperatura superficial exterior, para os dois anos climáticos de referência, foram semelhantes, apesar da ligeira superioridade observada no *MRY*. Quanto ao mínimo, foi verificado no *TRY* enquanto o máximo se registou no *MRY*. Tais dissimilaridades têm por base as diferentes metodologias utilizadas na determinação dos anos de referência. Em relação à humidade relativa na superfície exterior, apesar de na Figura 51 os *boxplots* serem semelhantes, é notória uma maior variância deste parâmetro no que diz respeito ao *MRY* (Tabela 20), o que seria de esperar, uma vez que este ano climático foi definido de acordo com os riscos de acumulação de humidade.

Relativamente aos resultados das simulações obtidos para o teor de humidade existente nas diversas camadas, estes, foram muito semelhantes excetuando-se a camada de reboco exterior cuja vulnerabilidade às condições climáticas exteriores é superior devido à sua localização no elemento construtivo, bem como às propriedades do mesmo. Neste caso, é evidente a diferenciação entre a utilização dos dois anos climáticos de referência, sendo que o *MRY* apresenta os resultados mais gravosos. Quanto ao teor de humidade total as diferenças observadas foram pouco significativas.

5.2.2 PAREDE SIMPLES COM ISOLAMENTO PELO EXTERIOR

À semelhança do procedimento efetuado para a tipologia de parede anteriormente apresentada, seguem-se os *boxplots* e as medidas estatísticas dos resultados obtidos na simulação higrotérmica desta tipologia de parede (Figura 55, Figura 56, Figura 57, Figura 58 e Tabela 21).

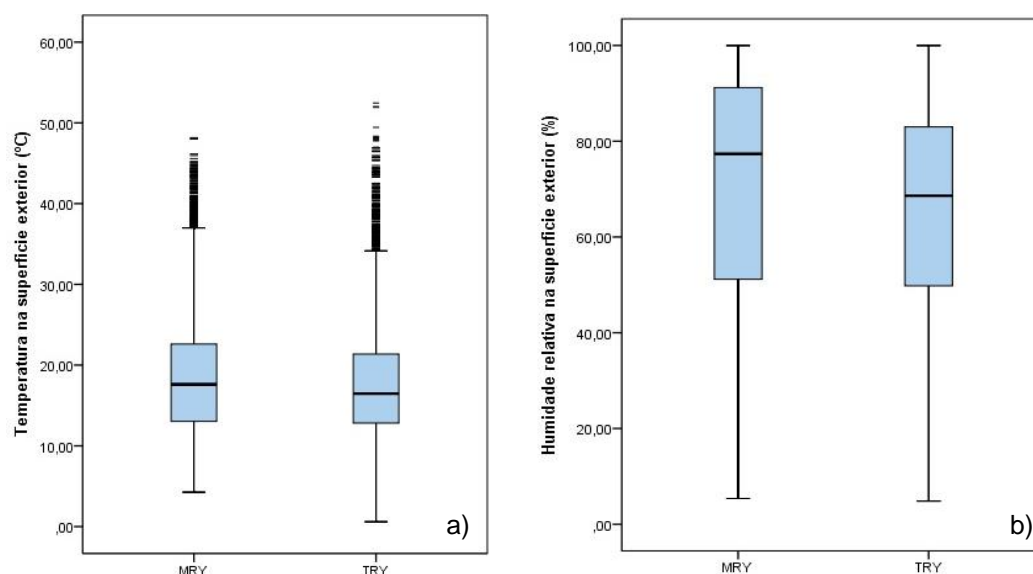


Figura 55 – *Boxplot* dos resultados da simulação para uma parede simples com isolamento pelo exterior (*MRY* e *TRY*): a) temperatura na superfície exterior [°C], b) humidade relativa na superfície exterior [%]

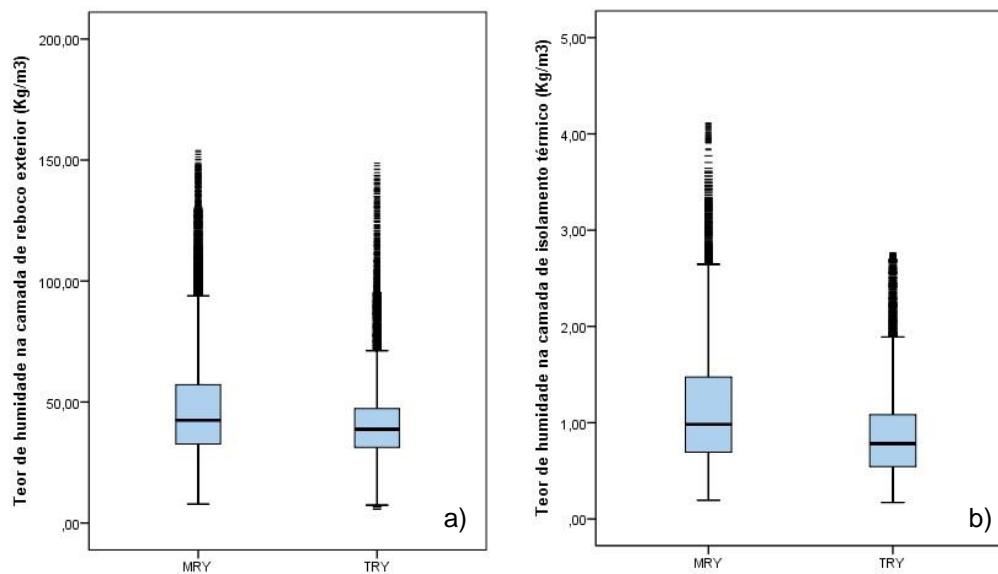


Figura 56 – *Boxplot* dos resultados da simulação para uma parede simples com isolamento pelo exterior (MRY e TRY): a) teor de humidade na camada de reboco exterior [kg/m^3], b) teor de humidade na camada de isolamento térmico [kg/m^3]

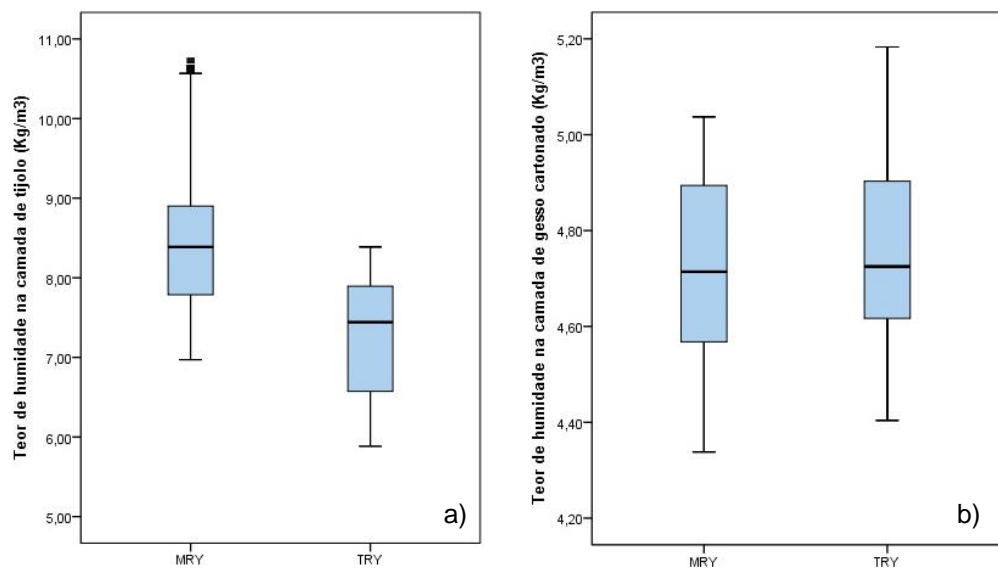


Figura 57 – *Boxplot* dos resultados da simulação para uma parede simples com isolamento pelo exterior (MRY e TRY): a) teor de humidade na camada de tijolo [kg/m^3], b) teor de humidade na de gesso cartonado [kg/m^3]

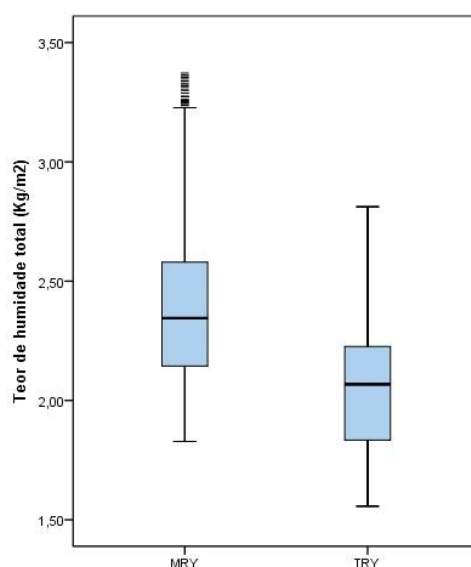


Figura 58 – *Boxplot* do teor de humidade total [kg/m^2] de uma parede simples com isolamento pelo exterior (*MRY* e *TRY*)

Tabela 21 – Medidas estatísticas descritivas dos resultados das simulações para as diversas camadas de uma parede simples com isolamento pelo exterior (*MRY* e *TRY*)

Medidas Estatísticas	Temperatura na superfície exterior [°C]		Humidade relativa na superfície exterior [%]		Teor de humidade na camada de reboco exterior [kg/m^3]	
	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>
Média	18,791	17,598	70,528	65,798	49,800	42,573
Mediana	17,613	16,460	77,348	68,606	42,470	38,751
Variância	58,338	49,332	604,073	477,874	698,185	407,477
Desvio Padrão	7,638	7,024	24,578	21,860	26,423	20,186
Mínimo	4,267	0,592	5,373	4,850	7,817	5,645
Máximo	48,160	52,470	100,000	99,999	153,946	148,668
Assimetria	0,872	0,980	-0,603	-0,424	1,371	1,926
	Teor de humidade na camada de isolamento térmico [kg/m^3]		Teor de humidade na camada de tijolo [kg/m^3]		Teor de humidade na camada de gesso cartonado [kg/m^3]	
	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>
Média	1,160	0,893	8,420	7,279	4,725	4,753
Mediana	0,982	0,783	8,388	7,442	4,714	4,725
Variância	0,416	0,236	0,630	0,491	0,030	0,028

Desvio Padrão	0,645	0,486	0,794	0,701	0,173	0,168
Mínimo	0,195	0,171	6,970	5,884	4,338	4,404
Máximo	4,112	2,760	10,758	8,387	5,037	5,183
Assimetria	1,274	1,317	0,447	-0,365	-0,003	0,167
Teor de humidade total [kg/m ²]						
	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>				
Média	2,375	2,055				
Mediana	2,345	2,068				
Variância	0,076	0,061				
Desvio Padrão	0,276	0,247				
Mínimo	1,828	1,557				
Máximo	3,372	2,812				
Assimetria	0,509	0,222				

Segundo os resultados obtidos para a temperatura e humidade relativa superficial exterior, as diferenças entre a utilização do *MRY* e do *TRY* foram semelhantes às verificadas na tipologia de parede anteriormente analisada. Cerca de 1°C entre as médias dos valores da temperatura e cerca de 5% para a humidade relativa, correspondendo os valores mais altos ao *MRY*. Apesar deste facto, anteriormente justificado, é notório o aumento dos valores da variância nesta tipologia de parede. Isto, deve-se à localização da camada de isolamento térmico (neste caso, no exterior) que faz aumentar a variação destes parâmetros do lado exterior à respetiva camada, devido às propriedades da mesma. Tal facto, é também visível em relação ao teor de humidade presente na camada de reboco exterior, verificando-se uma diferença notável entre as duas tipologias de parede, uma vez que os valores desse parâmetro (variância) foram consideravelmente superiores (Tabela 20 e Tabela 21). Em relação à diferença verificada entre as médias do teor de humidade nesta camada, foi possível observar um aumento da mesma (cerca de 7 kg/m³), nesta tipologia de parede, em relação ao observado na tipologia de parede anteriormente analisada (cerca de 3 kg/m³).

No diz respeito às diferenças verificadas no uso do *MRY* e do *TRY*, em relação ao teor de humidade das restantes camadas, observou-se que os resultados obtidos para o *MRY* são os mais gravosos, verificando-se valores superiores, em todas as camadas, à exceção da camada de gesso cartonado que é fortemente influenciada pelas condições climáticas interiores (Figura 56 e Figura 57), tendo-se, portanto, verificado resultados muito semelhantes.

Da mesma forma, relativamente ao teor de humidade total (Figura 58), os resultados obtidos foram superiores no *MRY*, observando-se a presença de *outliers* junto ao extremo superior, contrariamente aos resultados do *TRY* em que estes não se verificaram, apesar de terem sido observados valores mais baixos deste parâmetro, em relação à primeira tipologia de parede analisada (Figura 54). Mais uma vez, este facto deve-se às propriedades e à localização da camada de isolamento térmico, contribuindo para uma menor acumulação de humidade, ao longo do elemento construtivo.

5.2.3 PAREDE DUPLA COM ISOLAMENTO NA CAIXA-DE-AR

Por último, quanto aos resultados obtidos na simulação higrotérmica da parede dupla com isolamento na caixa-de-ar, foram obtidos os *boxplots* apresentados nas figuras que se seguem (Figura 59, Figura 60, Figura 61, Figura 62 e Figura 63) e as medidas estatísticas presentes na Tabela 22.

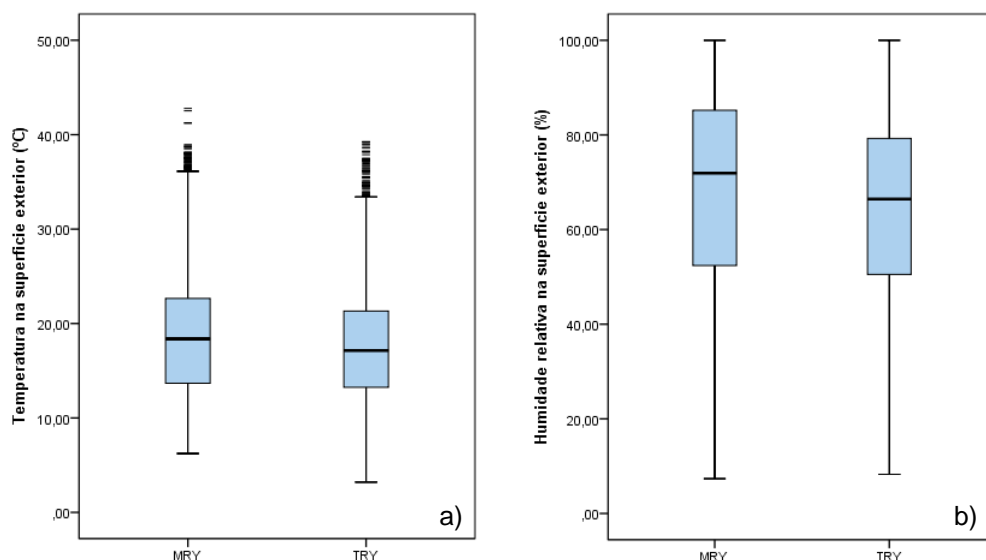


Figura 59 – *Boxplot* dos resultados da simulação para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (MRY e TRY): a) temperatura na superfície exterior [°C], b) humidade relativa na superfície exterior [%]

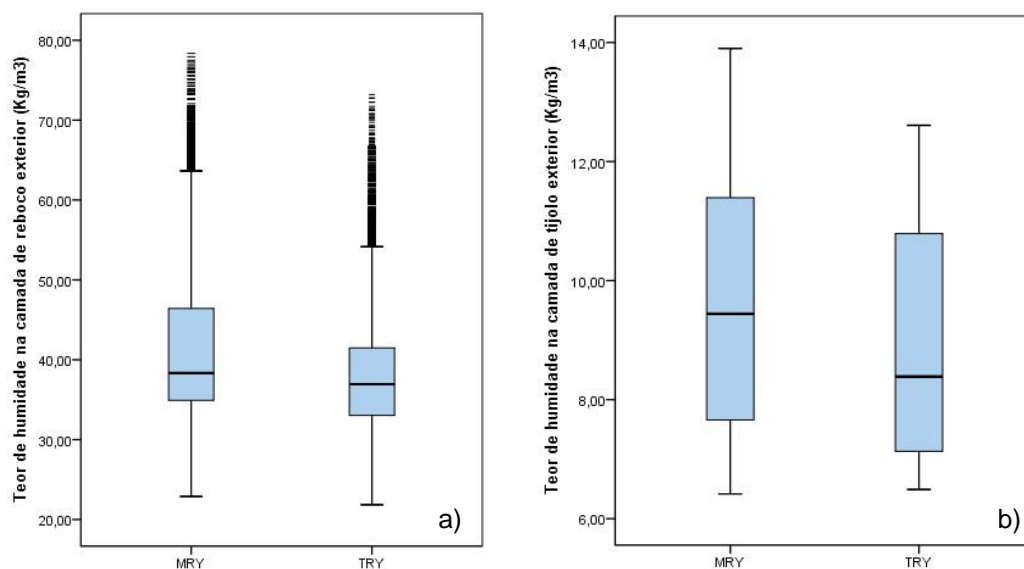


Figura 60 – *Boxplot* dos resultados da simulação para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (MRY e TRY): a) teor de humidade na camada de reboco exterior [kg/m³], b) teor de humidade na camada de tijolo exterior [kg/m³]

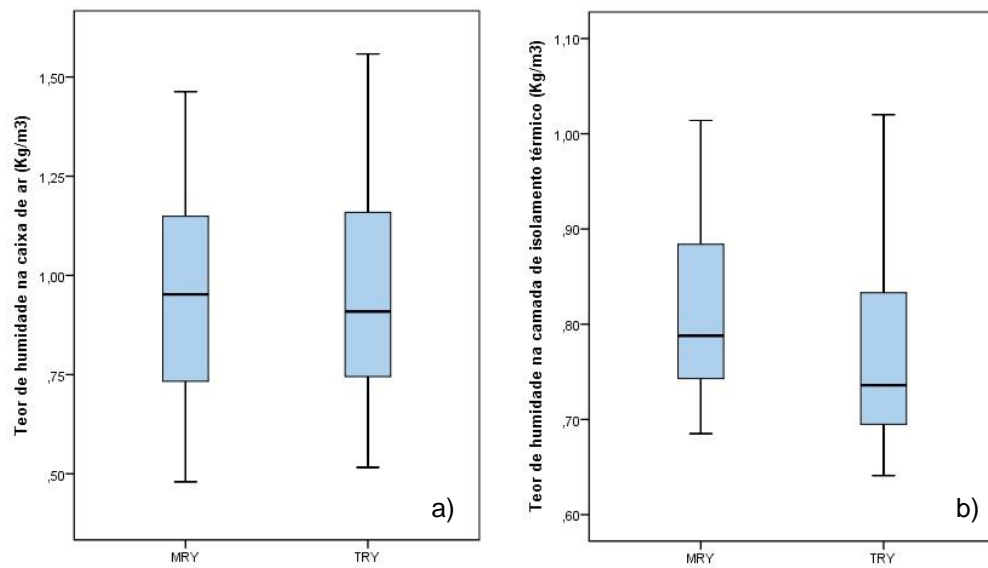


Figura 61 – *Boxplot* dos resultados da simulação para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (MRY e TRY): a) teor de humidade na caixa-de-ar [kg/m³], b) teor de humidade na camada de isolamento térmico [kg/m³]

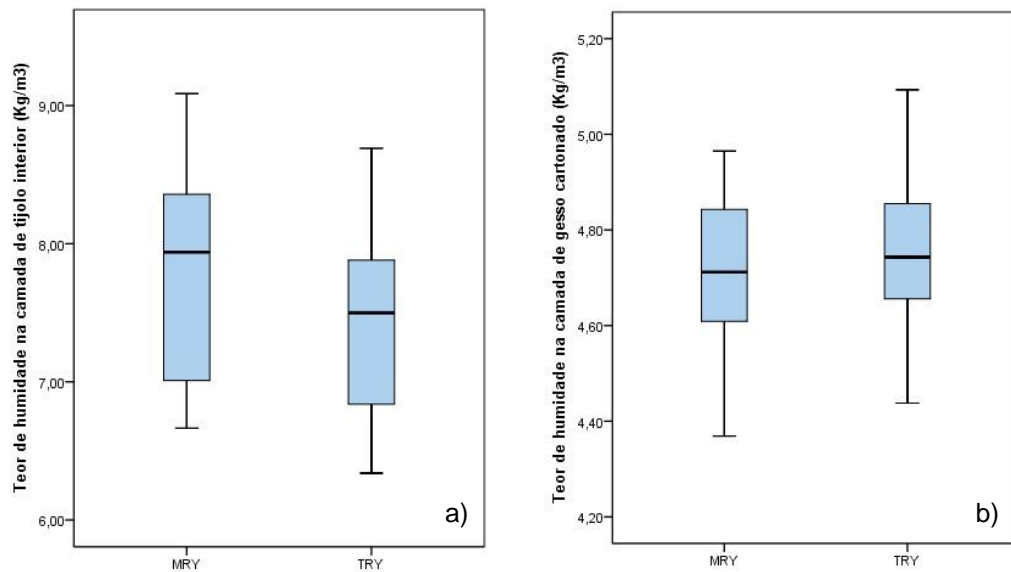


Figura 62 – *Boxplot* dos resultados da simulação para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (MRY e TRY): a) teor de humidade na camada de tijolo interior [kg/m³], b) teor de humidade na camada de gesso cartonado [kg/m³]

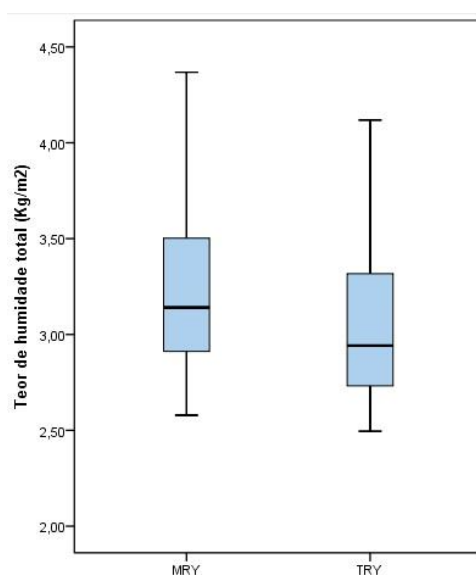


Figura 63– *Boxplot* do teor de humidade total [kg/m²] de uma parede dupla com isolamento na caixa de ar (*MRY* e *TRY*)

Tabela 22 – Medidas estatísticas descritivas dos resultados das simulações para as diversas camadas de uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (*MRY* e *TRY*)

Medidas Estatísticas	Temperatura na superfície exterior [°C]		Humidade relativa na superfície exterior [%]		Teor de humidade na camada de reboco exterior [kg/m ³]	
	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>
Média	18,790	17,586	68,915	64,790	41,415	38,732
Mediana	18,379	17,132	71,925	66,456	38,334	37,252
Variância	39,186	33,478	481,495	409,363	94,539	71,165
Desvio Padrão	6,260	5,786	21,943	20,233	9,723	8,436
Mínimo	6,235	3,200	7,341	8,270	22,892	22,000
Máximo	42,773	39,250	100,000	100,00	78,351	73,480
Assimetria	0,534	0,508	-0,372	-0,204	1,055	1,060
	Teor de humidade na camada de tijolo exterior [kg/m ³]		Teor de humidade na caixa-de-ar [kg/m ³]		Teor de humidade na camada de isolamento térmico [kg/m ³]	
	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>
Média	9,540	9,139	0,951	0,954	0,814	0,774
Mediana	9,442	8,541	0,952	0,920	0,788	0,740
Variância	4,428	4,546	0,056	0,056	0,007	0,008

Desvio Padrão	2,104	2,132	0,236	0,237	0,084	0,092
Mínimo	6,414	6,580	0,480	0,520	0,685	0,640
Máximo	13,901	12,940	1,463	1,500	1,014	1,030
Assimetria	0,317	0,461	0,093	0,317	0,523	0,849
	Teor de humidade na camada de tijolo interior [kg/m³]		Teor de humidade na camada de gesso cartonado [kg/m³]		Teor de humidade total [kg/m²]	
	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>	<i>MRY</i>	<i>TRY</i>
Média	7,783	7,428	4,721	4,747	3,226	3,072
Mediana	7,939	7,533	4,712	4,746	3,141	2,980
Variância	0,480	0,433	0,018	0,016	0,151	0,132
Desvio Padrão	0,693	0,658	0,133	0,128	0,389	0,363
Mínimo	6,664	6,350	4,369	4,440	2,579	2,510
Máximo	9,087	8,750	4,965	5,030	4,368	4,110
Assimetria	-0,153	0,030	-0,161	-0,136	0,573	-0,999

Nesta tipologia de parede, verificou-se que os valores da temperatura e humidade relativa na superfície exterior, foram idênticos aos verificados para a parede simples com isolamento pelo interior, o que era espetável. O mesmo se verificou para o teor de humidade da camada de reboco exterior, assim como para a camada de tijolo exterior, apesar de a variância ter sido ligeiramente superior (tanto no *MRY* como no *TRY*, para a camada de reboco), nesta tipologia de parede (Tabela 21 e Tabela 22). Este facto é justificável pela semelhança entre as características de uma parede simples com isolamento pelo interior e o pano exterior de uma parede dupla com isolamento na caixa dar, tendo em conta a influência do clima exterior nos respetivos elementos construtivos e as suas propriedades. Refira-se que os valores do *MRY* foram novamente superiores aos valores obtidos para o *TRY*, nas respetivas camadas.

Por outro lado, o teor de humidade verificado na caixa-de-ar, para os dois anos climáticos de referência, foi idêntico. Tal evidência, deve-se às propriedades desta camada. Quanto às restantes camadas, os valores obtidos entre os dois anos climáticos de referência são, novamente, muito aproximados notando-se uma maior diferença, apesar de pequena (cerca de 0,3kg/m³ entre as médias correspondentes o *MRY* e ao *TRY*), na camada de tijolo interior.

À semelhança do teor de humidade total verificado na primeira tipologia de parede, a média deste parâmetro relativamente ao *MRY*, foi cerca de 3,2 kg/m² enquanto no *TRY* foi cerca de 3,0 kg/m², observando-se, novamente, uma maior influencia do *MRY*, no que se refere a riscos de acumulação de humidade.

5.2.4 RELATIVE HUMIDITY AND TEMPERATURE INDEX (RHTI)

Tal como referido anteriormente, a partir dos resultados das simulações higrotérmicas, para o *MRY*, foi também possível obter os valores do *RHTI*, na sequência do método do *Climatic Index*, utilizado a

determinação do mesmo. Assim, e de acordo com as diversas tipologias de parede, foram calculados os respectivos valores, tendo em conta a zona mais crítica de cada elemento construtivo, no que diz respeito aos riscos de acumulação de humidade. Seguem-se, na Figura 64, Figura 65 e Figura 66, os exemplos elucidativos das zonas definidas para cada tipologia de parede [15].

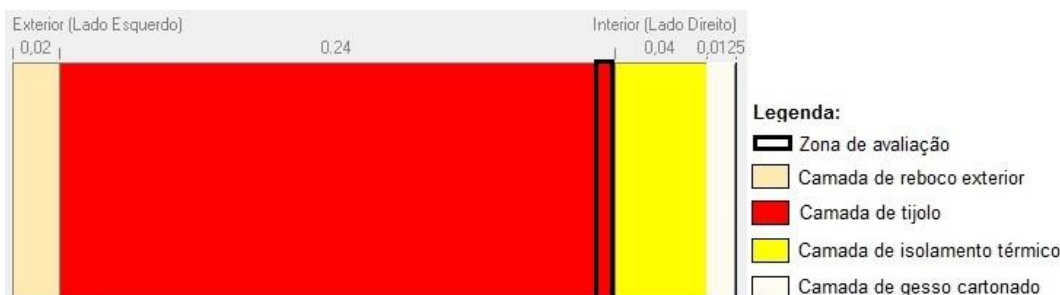


Figura 64 – Zona de avaliação da parede simples com isolamento pelo interior



Figura 65 – Zona de avaliação da parede simples com isolamento pelo exterior

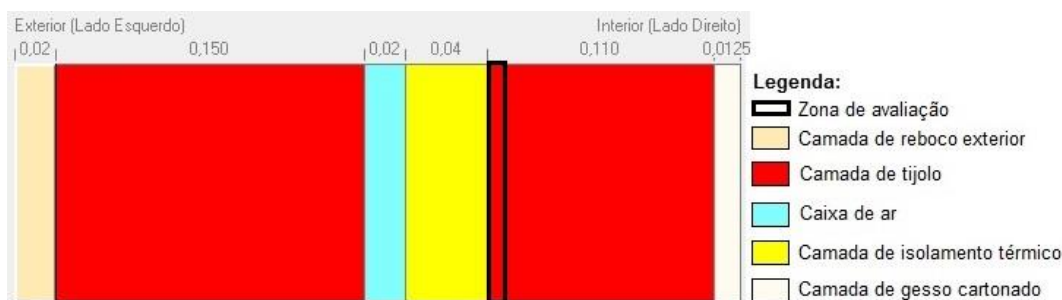


Figura 66 – Zona de avaliação da parede dupla com isolamento na caixa-de-ar

Desta forma, foram determinados os valores do *RHTI*, a partir dos valores da temperatura e humidade relativa nas respetivas zonas, de acordo com a Equação 21:

$$RHTI = \sum([RH - RH_x] * [T - T_x]) \quad (21)$$

com $RH > RH_x$ e $T > T_x$, sendo RH_x e T_x variáveis que definem os limites de humidade relativa (RH) e temperatura (T), e que dependem das condições de durabilidade, do risco de degradação estrutural e da probabilidade de ocorrência e desenvolvimento de bolores. Neste caso, foram considerados os valores 80% e 5°C para o RH_x e T_x , respetivamente, utilizados nos casos em que se pretende avaliar os mecanismos de degradação devido à ocorrência de humidades e desenvolvimento de bolores. Note-se

que os valores de RH e de T foram obtidos numa base horária, sendo o *RHTI*, definido pelo somatório das médias desses parâmetros, em intervalos de 10 em 10 dias [15].

Na Tabela 23, apresentam-se os valores de *RHTI*, de acordo com cada tipologia de parede, para os anos considerados mais críticos, respeitantes às várias metodologias utilizadas para a determinação do *MRY*.

Tabela 23 – Valores do *RHTI* para a série de anos mais crítica de acordo com os resultados dos vários métodos do *MRY*

Tipologia de parede	2012	2013	2014	2015	2016
Parede simples com isolamento pelo interior	0,000	196,225	1916,369	0,000	0,000
Parede simples com isolamento pelo exterior	0,000	924,446	0,000	0,000	0,000
Parede dupla com isolamento na caixa-de-ar	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Após a observação dos valores apresentados, é possível verificar que o maior valor do *RHTI*, foi verificado no ano 2014, o que era de esperar, sendo que este o ano foi o ano assinalado como *MRY*. É de notar que, apesar desta evidência observada, no caso de uma parede simples com isolamento pelo interior, o mesmo não se verificou para uma tipologia de parede simples com isolamento pelo exterior. Neste caso, 2013 foi o ano cujo valor de *RHTI* foi o mais elevando, sendo que nos restantes anos observaram-se valores nulos. Tal facto, pode ter sido originado pela relação entre os valores de HR e de T, que constituem este índice, uma vez que sempre que um dos valores for nulo, isto é, sempre que $RH < RH_x$ ou $T < T_x$, o respetivo valor de *RHTI* também é nulo.

Quanto à parede dupla com isolamento na caixa-de-ar, os valores determinados para todos os anos foram nulos, o que nos indica que esta tipologia de parede torna-se uma resposta mais viável aos riscos de degradação devido à ocorrência de humidades e desenvolvimento de bolores, apesar de esta ser a mais dispendiosa.

Apesar dos resultados obtidos, e da possível dúvida acerca da escolha do *MRY*, uma vez que no ano 2013 este índice apresentou valores para duas tipologias de parede, enquanto em 2014 apenas se verificou para a parede simples com isolamento pelo interior, é notória a diferença entre os valores obtidos entre 2013 e 2014, referentes a essa tipologia de parede. Refira-se que, no método do *Climatic Index*, o ano 2014 surgiu em primeira posição (ano mais crítico) enquanto 2013 surgiu em terceira, tendo este último sido sinalizado, apenas em mais uma das restantes metodologias, em segunda posição. Desta forma, confirma-se a escolha do ano 2014, como o *MRY* da cidade do Porto.

5.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.3.1 NOTA INTRODUTÓRIA

Para melhor se compreender as semelhanças e/ou dissimelhanças existentes entre a utilização dos dois anos climáticos de referência (*MRY* e *TRY*), na simulação higrotérmica das diversas tipologias de parede, foram realizados dois testes estatísticos não paramétricos, de duas amostras independentes:

- Teste de Mann-Whitney;
- Teste de Kolmogorov-Smirnov.

Deste modo, foram testados todos os parâmetros resultantes das diversas simulações, para se avaliar a igualdade estatística entre as duas amostras (*MRY* e *TRY*). Para o efeito, foram analisados os valores do parâmetro estatístico “*p*” que determina se duas amostras podem ser consideradas iguais, ou seja, se há rejeição da hipótese nula ou não. Para o efeito, foi utilizado um nível de significância de 5%. Sempre que o valor deste parâmetro for igual ou inferior ao nível de significância, existem evidências estatísticas acerca das diferenças entre o par de amostras avaliado. Foi também considerado o parâmetro estatístico “*z*”, que representa as diferenças existentes entre os dois anos climáticos de referência, para cada variável. Quanto maior o valor de *z*, maior a divergência entre os valores das amostras analisadas, isto é, quanto menor for o valor de *z* menor será a diferença existente entre as amostras e, portanto, maior será o valor de *p*.

De forma a ilustrar as tendências dos parâmetros exportados a partir das simulações higrotérmicas e posteriormente relacionar com os valores obtidos através dos testes estatísticos anteriormente referidos, foram também determinadas as frequências acumuladas de cada parâmetro, para cada tipologia de parede. Note-se, que quanto menor for o valor de *z*, mais se aproximam as curvas de frequências acumuladas, e vice-versa.

5.3.2 PAREDE SIMPLES COM ISOLAMENTO PELO INTERIOR

Através da análise das curvas de frequências acumuladas (Figura 67, Figura 68 e Figura 69) e dos valores de *p* e de *z* determinados para ambos os testes estatísticos aplicados (Tabela 24 e Tabela 25), referentes aos diferentes parâmetros avaliados na simulação higrotérmica desta tipologia de parede, para os dois anos climáticos de referência (*MRY* e *TRY*), foi possível verificar a tendência dos mesmos, assim como evidenciar as semelhanças e/ou divergências entre o par de amostras analisado.

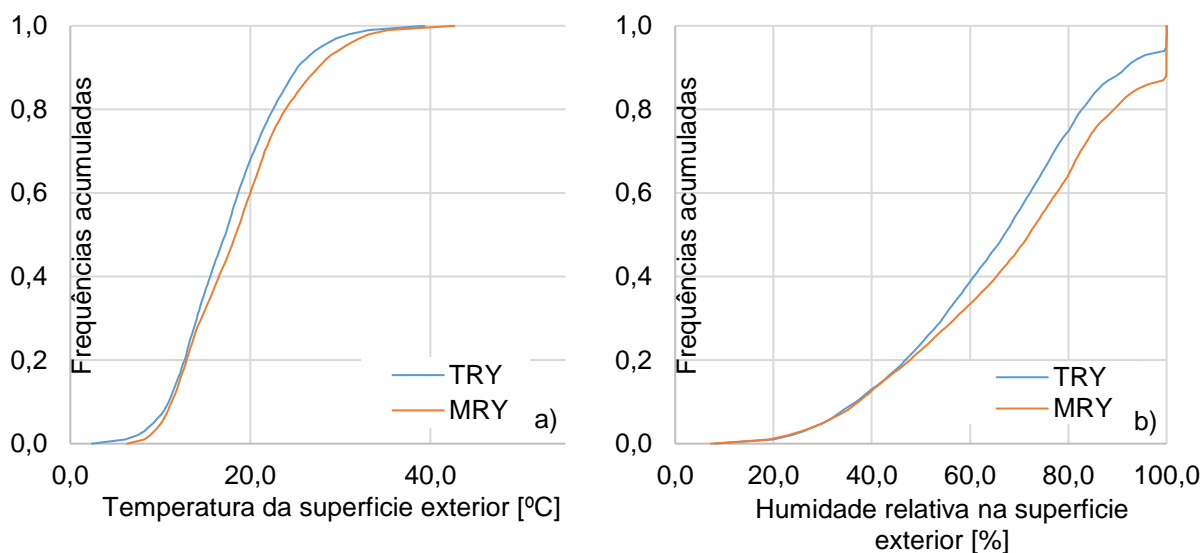


Figura 67 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede simples com isolamento pelo interior (*MRY* e do *TRY*): a) temperatura na superfície exterior [°C], b) humidade relativa na superfície exterior [%]

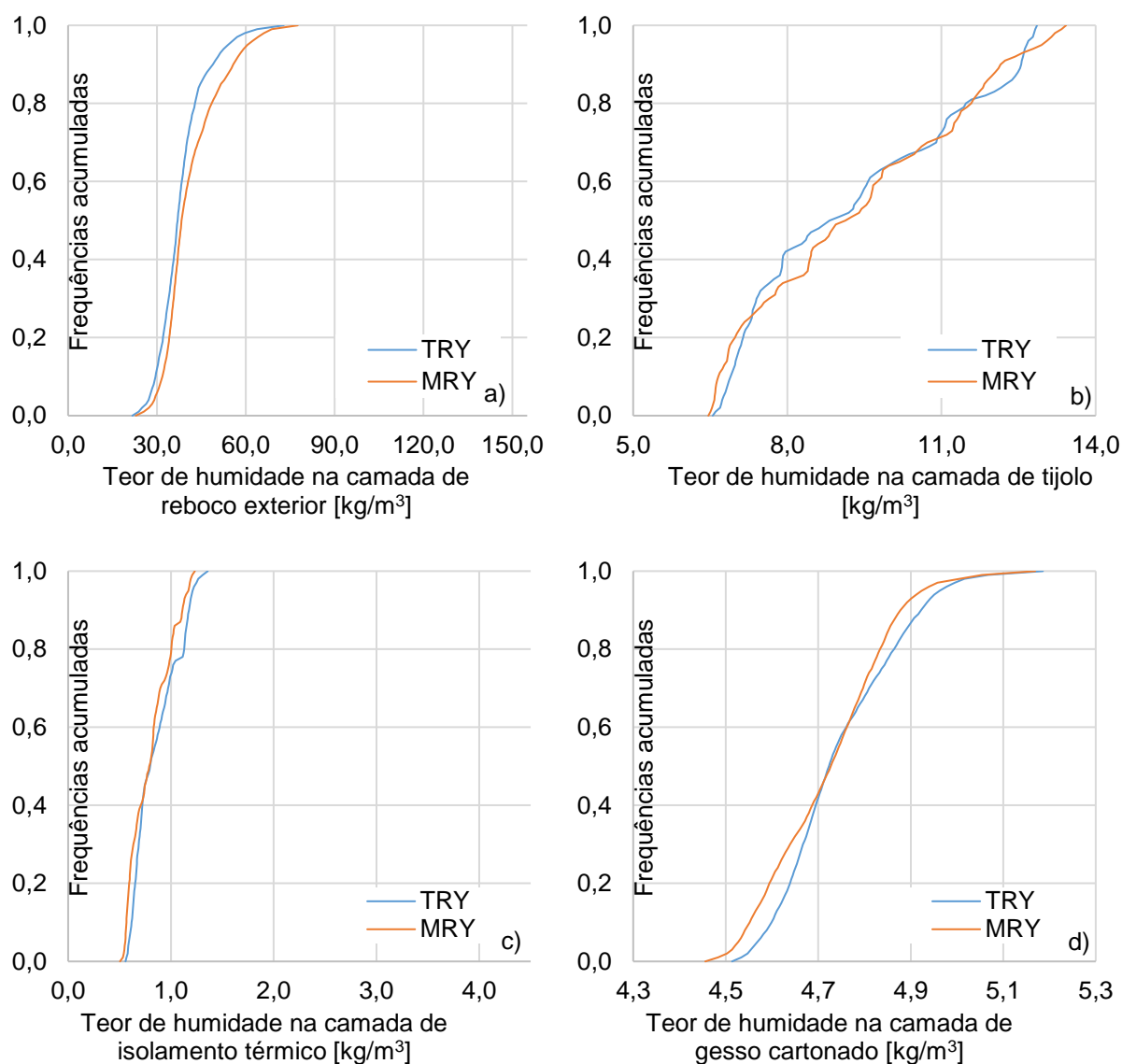


Figura 68 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede simples com isolamento pelo interior (MRY e do TRY): a) teor de humidade na camada de reboco exterior $[\text{kg/m}^3]$, b) teor de humidade na camada tijolo $[\text{kg/m}^3]$, c) teor de humidade na camada de isolamento térmico $[\text{kg/m}^3]$, d) teor de humidade na camada de gesso cartonado $[\text{kg/m}^3]$

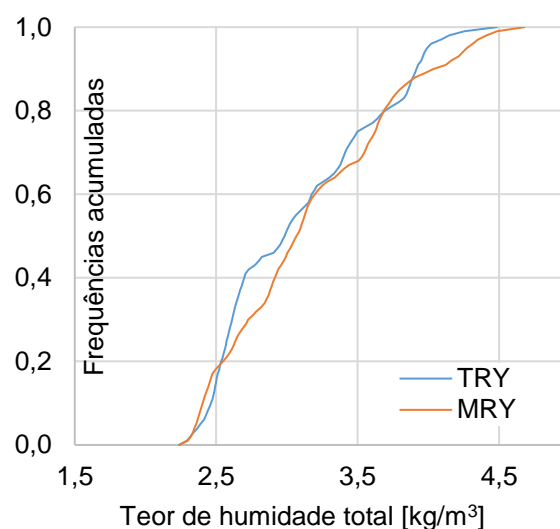


Figura 69 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede simples com isolamento pelo interior (*MRY* e do *TRY*): teor de humidade total [kg/m^3]

Tabela 24 – Teste estatístico de Mann-Whitney aplicado aos resultados da simulação do *MRY* e do *TRY* para uma parede simples com isolamento pelo interior

	Temperatura na superfície exterior [$^{\circ}\text{C}$]	HR na superfície exterior [%]	Teor de humidade em cada camada [kg/m^3]				Teor de humidade total [kg/m^2]
			Reboco exterior [kg/m^3]	Tijolo [kg/m^3]	Isolamento térmico [kg/m^3]	Gesso cartonado [kg/m^3]	
<i>z</i>	-10,478	-15,138	-20,628	-0,178	-17,253	-10,248	-6,558
<i>p</i>	0,000	0,000	0,000	0,859	0,000	0,000	0,000

Tabela 25 – Teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov aplicado aos resultados da simulação do *MRY* e do *TRY* para uma parede simples com isolamento pelo interior

	Temperatura na superfície exterior [$^{\circ}\text{C}$]	HR na superfície exterior [%]	Teor de humidade em cada camada [kg/m^3]				Teor de humidade total [kg/m^2]
			Reboco exterior [kg/m^3]	Tijolo [kg/m^3]	Isolamento térmico [kg/m^3]	Gesso cartonado [kg/m^3]	
<i>z</i>	5,527	8,515	8,833	6,295	11,270	7,194	7,911
<i>p</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Verificou-se que, a partir da análise estatística efetuada, as distribuições da temperatura e da humidade relativa superficial exterior, entre o *MRY* e o *TRY* (Figura 67), foram muito semelhantes. O mesmo aconteceu em relação ao teor de humidade verificado na camada de reboco exterior (Figura 68) apesar

de o valor de z ter sido superior em ambos os testes, relativamente aos valores dos parâmetros anteriormente referido, o que demonstra um maior afastamento entre os valores obtidos, entre as duas simulações. Note-se que as curvas de frequências acumuladas do *MRY*, referentes aos parâmetros anteriormente analisados, mantêm-se sempre à direita das curvas relativas ao *TRY*, o que significa que este último ano climático de referência é o menos gravoso. Facto este, também verificado através da estatística descritiva.

No que diz respeito à camada de tijolo verificou-se que o valor do nível de significância (0,05) foi ultrapassado no teste de Mann-Whitney (Tabela 24), o que significa que existiu alguma igualdade entre os valores das duas simulações tendo-se notado o cruzamento de ambas as curvas de frequências acumuladas, assim como a proximidade entre elas. É curioso referir que no teste de Kolmogorov-Smirnov (Tabela 25) esta igualdade não se observou.

Relativamente ao teor de humidade das restantes camadas (isolamento térmico e gesso cartonado), não foram verificadas igualdades em ambos os testes estatísticos, tendo-se apenas observado que as curvas de frequências acumuladas para o *TRY* mantiveram-se à direita das curvas referentes ao *MRY*, apesar de ambas serem muito semelhantes. Este facto é justificável pela forte influência das condições climáticas interiores.

Quanto ao teor de humidade total houve algum cruzamento entre as duas curvas de frequências acumuladas, apesar de não ter sido verificada nenhuma igualdade em relação aos testes estatísticos efetuados, devido às pequenas divergências visíveis na Figura 69.

5.3.3 PAREDE SIMPLES COM ISOLAMENTO PELO EXTERIOR

À semelhança do procedimento efetuado para a tipologia de parede anterior, seguem-se curvas de frequências acumuladas (Figura 70, Figura 71 e Figura 72) e os resultados dos testes estatísticos (Tabela 26 e Tabela 27), para esta tipologia de parede.

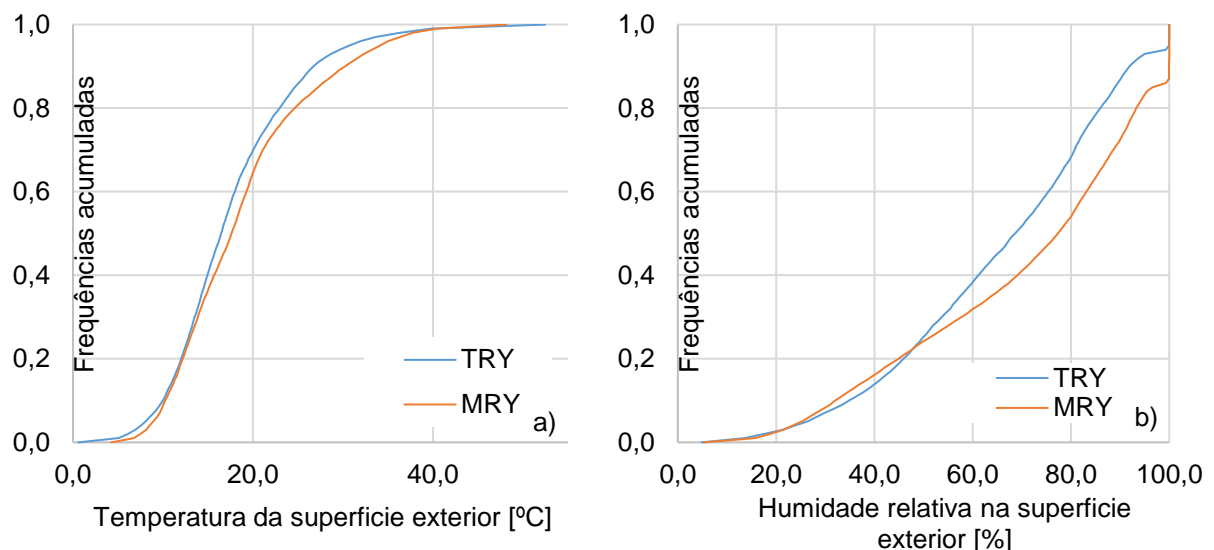


Figura 70 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede simples com isolamento pelo exterior (*MRY* e do *TRY*): a) temperatura na superfície exterior [°C], b) humidade relativa na superfície exterior [%]

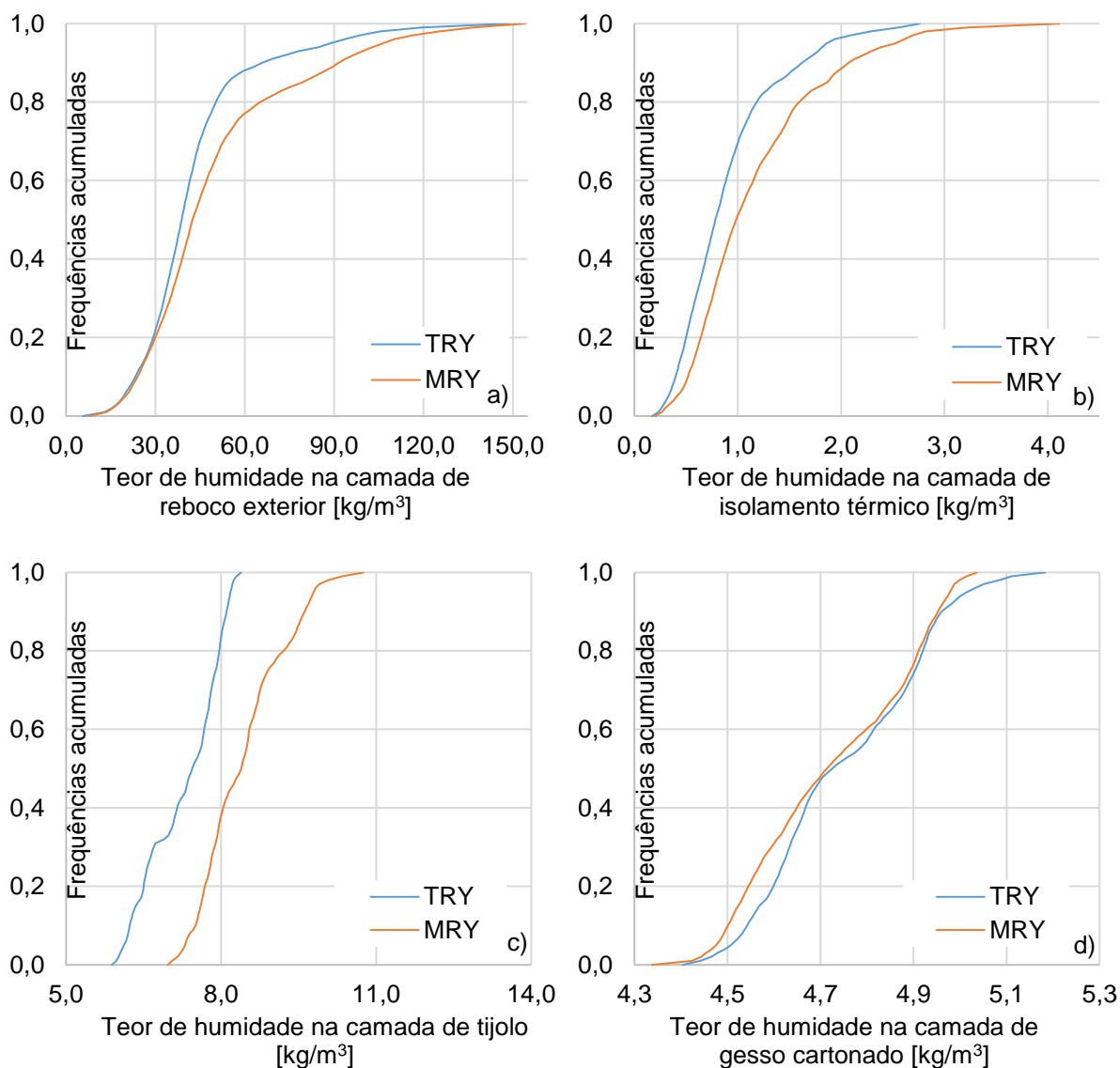


Figura 71 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede simples com isolamento pelo exterior (MRY e do TRY): a) teor de humidade na camada de reboco exterior [kg/m^3], b) teor de humidade na camada de isolamento térmico [kg/m^3], c) teor de humidade na camada tijolo [kg/m^3], d) teor de humidade na camada de gesso cartonado [kg/m^3]

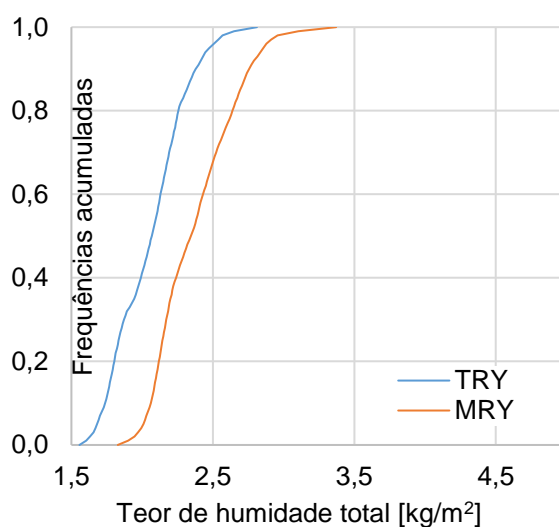


Figura 72 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede simples com isolamento pelo exterior (*MRY* e do *TRY*): teor de humidade total [kg/m^2]

Tabela 26 – Teste estatístico de Mann-Whitney aplicado aos resultados da simulação do *MRY* e do *TRY*, para uma parede simples com isolamento pelo exterior

	Temperatura na superfície exterior [$^{\circ}\text{C}$]	HR na superfície exterior [%]	Teor de humidade em cada camada [kg/m^3]				Teor de humidade total [kg/m^2]
			Reboco exterior [kg/m^3]	Isolamento térmico [kg/m^3]	Tijolo [kg/m^3]	Gesso cartonado [kg/m^3]	
<i>z</i>	-8,816	-16,575	-17,301	-29,201	-76,432	-9,730	-65,798
<i>p</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 27 – Teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov aplicado aos resultados da simulação do *MRY* e do *TRY*, para uma parede simples com isolamento pelo exterior

	Temperatura na superfície exterior [$^{\circ}\text{C}$]	HR na superfície exterior [%]	Teor de humidade em cada camada [kg/m^3]				Teor de humidade total [kg/m^2]
			Reboco exterior [kg/m^3]	Isolamento térmico [kg/m^3]	Tijolo [kg/m^3]	Gesso cartonado [kg/m^3]	
<i>z</i>	5,200	9,994	9,588	12,240	33,704	7,492	25,480
<i>p</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Em relação a esta tipologia de parede, facilmente se conclui que, dados os valores de *p* e de *z*, resultantes da aplicação dos testes não paramétricos, para todos os parâmetros avaliados (Tabela 26 e Tabela 27), não foram verificadas igualdades entre o uso dos dois anos climáticos de referência. Neste caso, é notório

o afastamento entre as curvas de frequências acumuladas relativas ao teor de humidade da camada de tijolo (Figura 71), assim como o teor de humidade total (Figura 72), sendo que o *MRY* apresenta os resultados mais gravosos, mantendo-se à direita da curva do *TRY*. É importante referir que, apesar de ter sido verificada uma maior divergência entre as curvas referidas, os valores obtidos nesta tipologia de parede, foram menores do que os verificados na parede simples com isolamento pelo interior, o que era previsível. É interessante denotar, que, nos casos em que a parede é isolada exteriormente, é notória a maior influência do *MRY* devido à menor capacidade de secagem desta tipologia de parede após a absorção e acumulação de humidade nas camadas interiores ao isolamento, destacando-se a camada de tijolo devido às suas propriedades.

Quanto ao teor de humidade, verificado através da curva de frequências acumuladas na camada de gesso cartonado (Figura 71), verificou-se que a curva do *TRY* manteve-se à direita da curva referente ao *MRY*, à semelhança do verificado e justificado na tipologia de parede anteriormente analisada (Figura 68).

5.3.4 PAREDE DUPLA COM ISOLAMENTO NA CAIXA-DE-AR

Por último, apresentam-se as curvas de frequências acumuladas (Figura 73, Figura 74 e Figura 75) e os resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney e de Kolmogorov-Smirnov (Tabela 28 e Tabela 29), referentes a uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar.

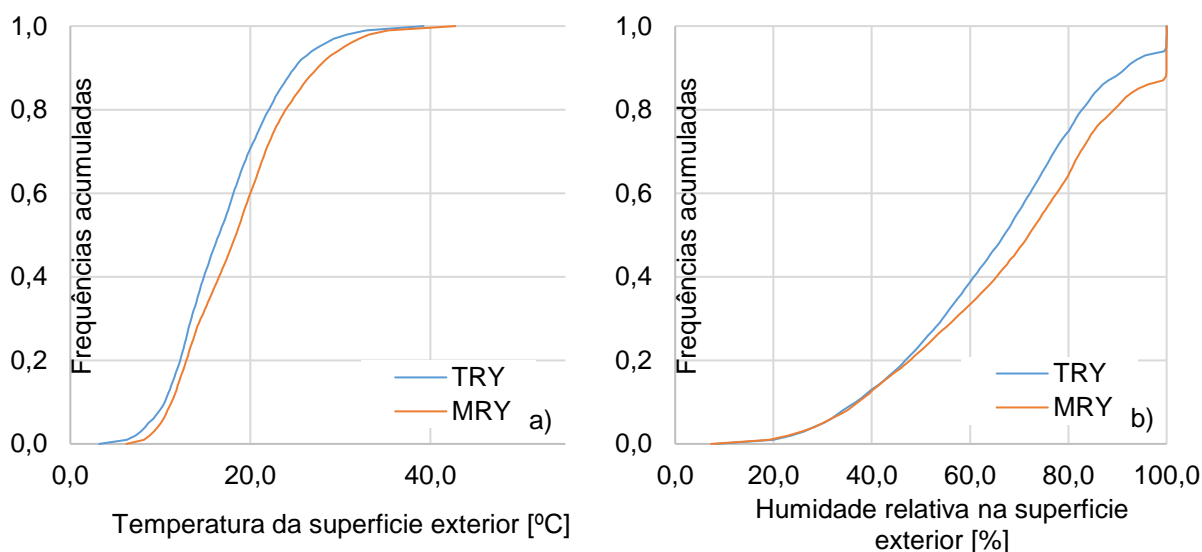


Figura 73 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (*MRY* e do *TRY*): a) temperatura na superfície exterior [°C], b) humidade relativa na superfície exterior [%]

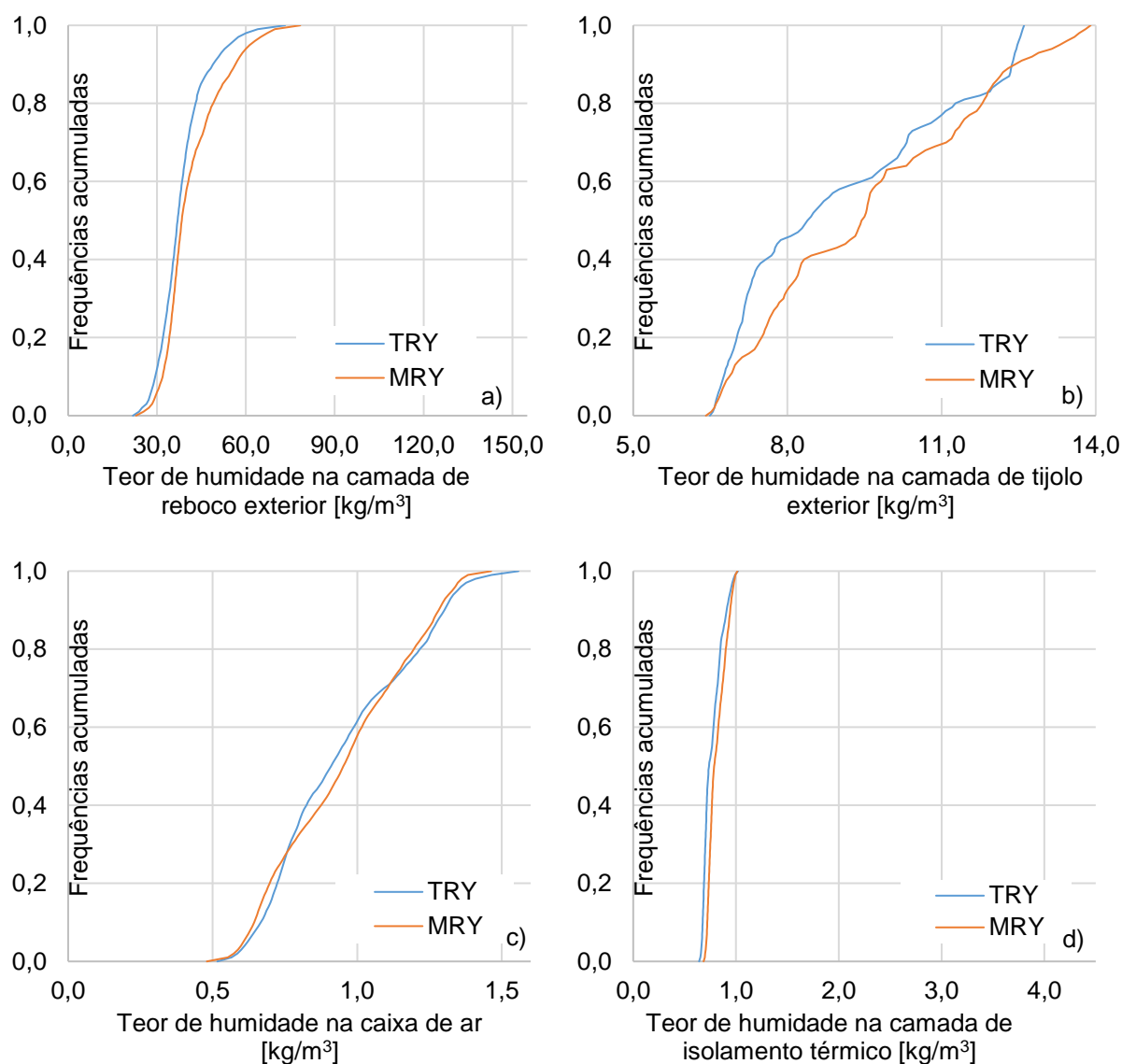


Figura 74 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (MRY e do TRY): a) teor de humidade na camada de reboco exterior $[\text{kg/m}^3]$, b) teor de humidade na camada de tijolo exterior $[\text{kg/m}^3]$, c) teor de humidade na caixa-de-ar $[\text{kg/m}^3]$, d) teor de humidade na camada de isolamento térmico $[\text{kg/m}^3]$

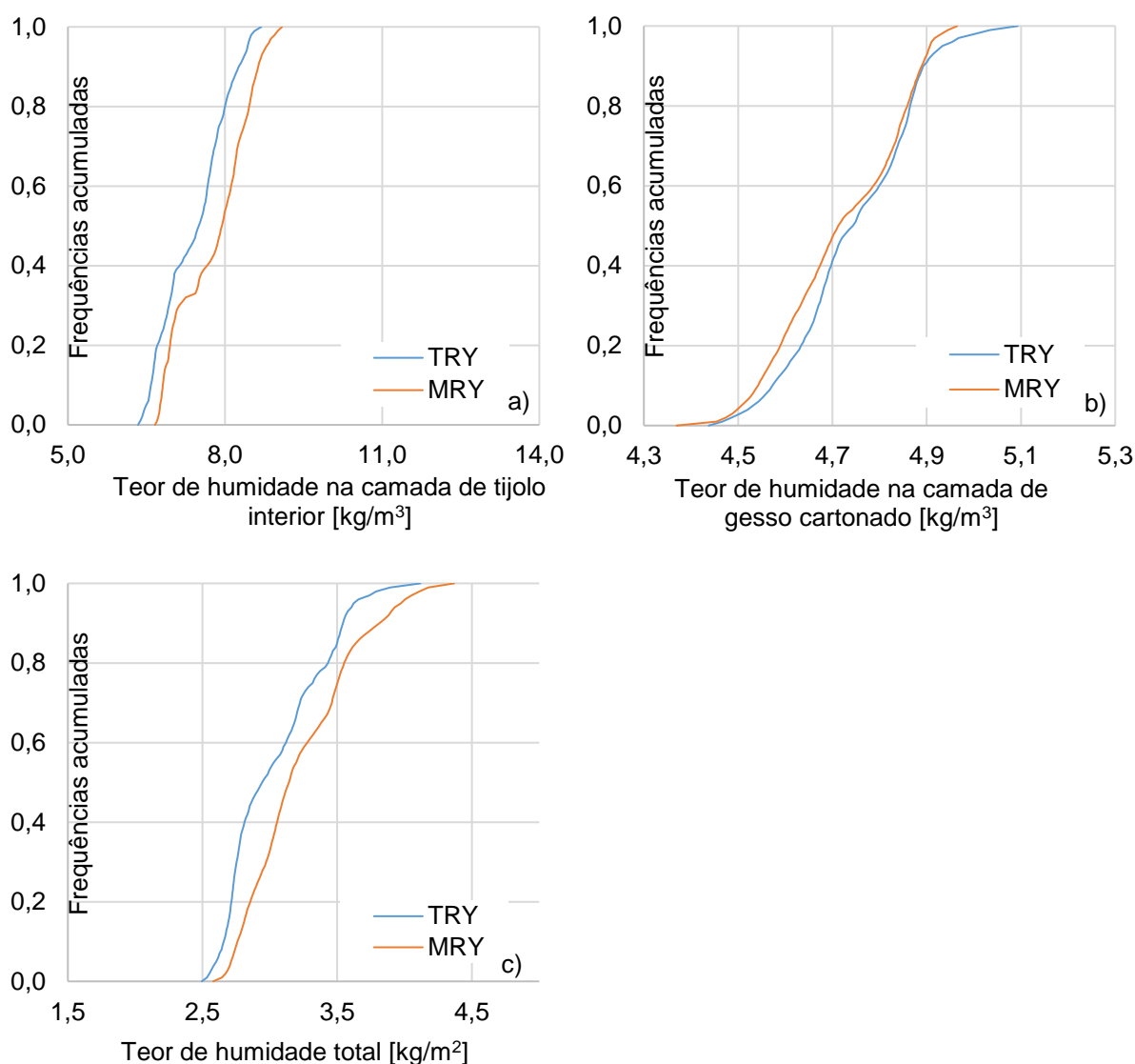


Figura 75 – Frequências acumuladas dos valores das simulações para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (*MRY* e do *TRY*): a) teor de humidade na camada tijolo interior [kg/m³], b) teor de humidade na camada de gesso cartonado [kg/m³], c) teor de humidade total [kg/m²]

Tabela 28 – Teste estatístico de Mann-Whitney dos resultados da simulação para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (*MRY* e do *TRY*)

	Temperatura na superfície exterior [°C]	HR na superfície exterior [%]	Teor de humidade em cada camada [kg/m³]						Teor de humidade total [kg/m²]
			Reboco exterior	Tijolo exterior	Caixa -de-ar	Isolamento térmico	Tijolo interior	Gesso cartonado	
<i>z</i>	-11,248	-13,735	-17,017	-13,039	-1,133	-35,670	-35,076	-12,350	-25,806
<i>p</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,257	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 29 – Teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov dos resultados da simulação para uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (*MRY* e do *TRY*)

	Temperatura na superfície exterior [°C]	HR na superfície exterior [%]	Teor de humidade em cada camada [kg/m ³]						Teor de humidade total [kg/m ²]
			Reboco exterior	Tijolo exterior	Caixa -de-ar	Isolamento térmico	Tijolo interior	Gesso cartonado	
<i>z</i>	5,843	8,016	7,082	11,410	4,312	19,188	16,373	7,177	14,094
<i>p</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Posteriormente à observação e análise dos resultados obtidos verificou-se que o gráfico de frequências acumuladas relativo à temperatura superficial exterior, assim como o gráfico relativo a humidade relativa na superfície exterior (Figura 73), são muito semelhantes aos gráficos determinados para as tipologias de parede anteriormente analisadas. O mesmo é possível verificar através da comparação entre os valores de *z* para as diversas tipologias (Tabela 24, Tabela 25, Tabela 26, Tabela 27, Tabela 28 e Tabela 29), verificando-se a maior diferença na tipologia de parede simples com isolamento pelo exterior.

Em relação aos restantes parâmetros avaliados, é notória a posição da curva de frequências acumuladas referente ao *MRY* em relação à do *TRY*, à direita, à exceção da camada de gesso cartonado e da caixa-de-ar. Neste ultimo caso, foi verificada uma igualdade entre o par de amostras avaliados, uma vez que o valor de *p* foi superior a 0,05 no teste estatístico de Mann-Whitney (Tabela 28). À semelhança do que foi observado em relação ao teor de humidade na camada de tijolo, relativa a tipologia de parede com isolamento térmico pelo interior, este resultado não foi confirmado através do teste de Kolmogorov-Smirnov (Tabela 29), não se podendo, deste modo, afirmar que existem evidências estatísticas fortes que demonstrem uma igualdade entre as amostras. Apesar disto, é possível observar, através da Figura 74, as semelhanças entre as curvas de frequências acumuladas. Nos restantes casos, não foi verificada nenhuma igualdade entre os pares de amostras analisados, em ambos os testes estatísticos realizados (Tabela 28 e Tabela 29).

Quanto à camada de isolamento térmico, é visível uma menor divergência entre os valores do teor de humidade, em relação às restantes tipologias de parede, variando, neste caso, entre 0,5 kg/m³ e 1 kg/m³, justificável pela presença de um corte hídrico (caixa de ar) existente na parede dupla.

5.4. SÍNTESE CRÍTICA

Após a análise efetuada, é importante referir que as diferenças verificadas entre a utilização do *MRY* e do *TRY* na simulação higratérmica, para cada camada do elemento construtivo a avaliar, não dependem da tipologia de parede, apesar desses valores aumentarem e diminuírem, uma vez que a influência das condições climáticas exteriores e a localização da camada em estudo, bem como as propriedades das mesmas, estão na origem destas variações.

Se compararmos os gráficos de frequências acumuladas, referentes à camada de tijolo de uma parede simples com isolamento pelo interior (Figura 68) e de uma parede simples com isolamento pelo exterior (Figura 71) verificamos que, apesar dos valores do teor de humidade serem superiores na primeira tipologia de parede referida (o que era expectável), o afastamento entre as respetivas curvas de frequências acumuladas, entre o *MRY* e o *TRY*, foi superior nesta ultima tipologia de parede. Este facto

é perfeitamente justificável pelas propriedades e posição da camada de isolamento térmico que influencia significativamente nos valores do teor de humidade observados nos respetivos elementos construtivos. Nestes casos torna-se mais evidente a distinção entre a utilização do *MRY* e do *TRY*, na simulação higrotérmica, destacando-se a maior influência do uso *MRY* no diz respeito a riscos de acumulação de humidade. O mesmo acontece se observarmos o gráfico de frequências acumuladas relativo à camada de tijolo interior da parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (Figura 75), apesar de esses valores serem menores (o que era expectável).

Deste modo, é possível concluir que, apesar de verificadas algumas tendências semelhantes através dos gráficos de frequências acumuladas entre os vários parâmetros avaliados (para as diversas tipologias de parede), tanto pela influência das condições climatéricas interiores (camada de gesso cartonado, Figura 68, Figura 71 e Figura 75) como pelas propriedades de algumas camadas, nomeadamente da caixa-de-ar (Figura 74), não foram observadas evidências estatísticas que comprovassem as semelhanças existentes entre as diversas camadas, asseguradas através dos resultados dos dois testes estatísticos realizados. Apesar de na caixa-de-ar e na camada de tijolo (na parede simples com isolamento pelo interior) terem sido verificados valores de p superiores ao nível de significância, no teste de Mann-Whitney, o mesmo não se verificou no teste de Kolmogorov-Smirnov. Assim, não é de todo correto afirmar que, nesses casos, os resultados entre a utilização do *TRY* e do *MRY* são semelhantes, apesar dos valores de z também terem sido os menores, de entre os dois testes efetuados, para os parâmetros avaliados.

De modo a evidenciar, com maior clareza, as diferenças entre a utilização do *MRY* e do *TRY*, no que diz respeito à avaliação do teor de humidade total nas diferentes tipologias de parede analisadas, foi aplicado um teste de hipóteses Z para duas amostras independentes com variâncias diferentes (*MRY* e *TRY* constituídos por 8760 horas e 7997 horas respetivamente), tendo-se obtido os resultados apresentados na Tabela 30. O valor de Z representa o rácio entre a diferença dos teores médios de humidade total e a variância total das duas amostras. Assim, quanto maior for o valor de Z maior será o risco a que se está sujeito ao usar-se, nas simulações higrotermicas, o ano de referência *TRY* em vez do *MRY* uma vez que, deste modo, não seriam tidas em consideração as situações climatéricas mais gravosas. Comparando os três tipos de parede, esse risco é menor numa parede simples com isolamento pelo interior sendo, no entanto, ainda estatisticamente significativo.

Tabela 30 – Teste de hipóteses aplicado aos resultados da simulação do *MRY* e do *TRY*, para o teor de humidade total nas diferentes paredes

	Parede simples com isolamento pelo interior	Parede simples com isolamento pelo exterior	Parede dupla com isolamento na caixa-de-ar
z	8,496	79,251	26,511

Desta forma, confirma-se que as diferenças entre a utilização do *MRY* e do *TRY* são mais visíveis nos casos em que a parede é exteriormente isolada, restando assim ressaltar que estas diferenças são fortemente influenciadas pelas camadas de tijolo e isolamento térmico, devido às suas propriedades e à localização dos mesmos, no elemento construtivo. Quanto aos resultados obtidos, pode-se concluir que a utilização do *MRY* nas simulações higrotérmicas, traduz-se na obtenção de resultados mais gravosos no que diz respeito aos problemas de acumulação de humidade.

6

CONCLUSÃO

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a correta avaliação do comportamento higrotérmico dos edifícios e posterior dimensionamento adequado, é necessário, em primeiro lugar, compreender as condições climáticas exteriores a que estes estão sujeitos. Portanto, é de todo o interesse para os projetistas, perceber e identificar as particularidades do clima existente no local que se pretende avaliar. Para o efeito, foram criados diversos anos climáticos de referência, a partir de metodologias distintas, conforme a finalidade a que estes se destinam, podendo ser utilizados tanto em simulações higrotérmicas como em simulações energéticas.

Assim, no presente trabalho, foram recolhidos e tratados os dados climáticos da estação meteorológica do LFC/FEUP, de modo a caracterizar o clima existente na cidade do Porto, e posteriormente prosseguir com a determinação do *Moisture Reference Year* e comparar as diferenças entre a utilização deste ano climático de referência com o *Test Reference Year*, elaborado por Sousa [58], na simulação higrotérmica de três elementos construtivos distintos. Note-se que este último é mais frequentemente utilizado em simulações energéticas.

No decorrer deste trabalho, surgiram algumas questões, nomeadamente na determinação da metodologia mais correta para a determinação do *MRY*, tendo-se utilizado três metodologias distintas, umas mais complexas do que outras. Facto é que, para os anos considerados mais críticos, foi observada alguma coerência entre os métodos. Desta forma, seria dispensável a utilização de um método mais elaborado, para a determinação do *MRY*. É importante realçar, que estas observações têm em conta os resultados provenientes da série de anos analisada. Esta, ao contrário do que é recomendado, é uma série relativamente curta (8 anos, 2009 a 2016), aproximando-se muito do valor mínimo desejado (10 anos).

Após a definição do *MRY* foram feitas simulações higrotérmicas e comparados os resultados obtidos com os resultados das simulações efetuadas para o *TRY*. Refira-se que, apesar de ambos terem sido determinados com base na mesma série de dados, foram utilizadas diferentes metodologias na colmatação das falhas existentes na mesma. Tal fator pode ter influenciado, de certo modo, os resultados das simulações obtidas. Note-se que, apesar do anteriormente referido, a metodologia utilizada para a determinação de cada ano climático de referência tem um peso mais significativo, na distinção dos mesmos, e consequentemente nas diferenças verificadas nas respetivas simulações.

Contudo, é importante referir que, após a análise dos resultados, as diferenças verificadas entre a utilização do *MRY* e do *TRY*, na simulação higrotérmica entre cada camada do elemento construtivo avaliado, não dependem da tipologia de parede, apesar desses valores aumentarem e diminuírem, uma vez que a influencia das condições climáticas exteriores e a localização da camada avaliada, bem como

as propriedades da mesma, estão na origem destas variações. Deste modo, é correto afirmar que a determinação do ano climático de referência deve ser independente do tipo de parede, à semelhança do referido por Djebbar *et al.* [49].

Tendo em conta os resultados avaliados para os diferentes parâmetros das simulações, é possível concluir que o *MRY* apresentou os resultados mais gravosos, no que diz respeito aos riscos de acumulação de humidade. Desta forma, é de extrema importância a distinção entre os anos climáticos de referência, tendo em conta a finalidade a que estes se destinam, sendo o *MRY* o ano climático de referência mais apropriado para as simulações higrotérmicas.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Uma vez que o presente trabalho incidiu sobre diversas metodologias para determinação do *Moisture Reference Year*, e tendo em conta que este foi determinado a partir de uma amostra relativamente pequena (8 anos), seria de todo importante, replicar a metodologia desenvolvida para uma amostra de dimensão superior, uma vez que esta conduzirá a um maior nível de fiabilidade nos resultados obtidos. Apesar de este processo não ter sido possível, devido à falta de acessibilidade a um conjunto de dados climático que respeitasse o mínimo adequado, é pertinente ponderar sobre o impacto da sua consideração nas conclusões obtidas.

Quanto à metodologia aplicada no tratamento e na colmatação das falhas, existentes na série de dados climáticos utilizada, é também importante refletir sobre o método mais adequado para o efeito, sendo sempre preferível a utilização de amostras sem falhas para a determinação dos anos climáticos de referência, o que nem sempre é possível. É também pertinente ponderar acerca da eliminação dos *outliers* existentes em cada amostra, uma vez que estes se distanciam significativamente da tendência natural da amostra a analisar. Desta forma, estes valores podem influenciar na determinação do ano climático de referência em causa, apesar da probabilidade de ocorrência dos mesmos ser reduzida.

Por fim, seria pertinente comparar as diferenças entre a utilização de alguns anos climáticos de referência (nomeadamente o *MRY* e o *TRY*) determinados através dos dados de 3 estações meteorológicas próximas, assim como através de estações de diversas regiões, com os anos climáticos de referência determinados apenas com base nos dados de uma estação, como foi caso no corrente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Andrade, H., *O clima urbano-natureza, escalas de análise e aplicabilidade*. Finis terra, 2005. **40** (80).
2. Karagiozis, A. and M. Salonvaara, *Hygrothermal system-performance of a whole building*. Building and Environment, 2001. **36** (6): p. 779-787.
3. Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). [visitado a março de 2017]; Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/>.
4. Alberto, Q., et al., *Avaliação da vulnerabilidade dos parâmetros climáticos e projecção de cenários climáticos*, 2007.
5. Khlebnikova, E., *Methods of climate classification*. Environmental Structure And Function: Climate System-Volume I, 2009: p. 246.
6. Góis, J.E.S., *Contribuição dos modelos estocásticos para o estudo da climatologia urbana*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2002.
7. Monteiro, A., *O Clima Urbano do Porto- Contribuição para a definição das estratégias de planeamento e ordenamento do território*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, 1993.
8. *Localização geográfica do Porto*. [visitado a março de 2017]; Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Porto#/media/File:Porto_freguesias_2013.svg.
9. McKnight, T.L., D. Hess, and L.J. Onesti, *Physical geography: a landscape appreciation*. Pearson Prentice Hall USA, 2005.
10. Alvares, C.A., et al., *Köppen's climate classification map for Brazil*. Meteorologische Zeitschrift, 2013. **22** (6): p. 711-728.
11. Allaby, M., *A dictionary of ecology*. Oxford University Press, 2010.
12. Peel, M.C., B.L. Finlayson, and T.A. McMahon, *Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification*. Hydrology and earth system sciences discussions, 2007. **4** (2): p. 439-473.
13. Feddema, J.J., *A revised Thornthwaite-type global climate classification*. Physical Geography, 2005. **26** (6): p. 442-466.
14. Morais, J., *Divisão climática de Portugal*. Memórias e Notícias: Publicações do Museu Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra, 1950 (27).
15. Zhou, X., D. Derome, and J. Carmeliet, *Robust moisture reference year methodology for hygrothermal simulations*. Building and Environment, 2016. **110**: p. 23-35.
16. Delgado, J.M., et al., *Hygrothermal numerical simulation tools applied to building physics*. Springer Science & Business Media, 2012.
17. Kalamees, T. and J. Vinha, *Estonian climate analysis for selecting moisture reference years for hygrothermal calculations*. Journal of Thermal Envelope and Building Science, 2004. **27**(3): p. 199-220.
18. Festa, R. and C.F. Ratto, *Proposal of a numerical procedure to select reference years*. Solar Energy, 1993. **50** (1): p. 9-17.

19. Kalamees, T. and J. Kurnitski, *Estonian test reference year for energy calculations*. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng, 2006. **12** (1): p. 40-58.
20. Pinheiro, J.L.C.A., *Importância do clima exterior e interior na quantificação do desempenho higrotérmico dos edifícios*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
21. Lund, H., *The Design Reference Year, users manual*. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark. Report, 1995.
22. Skartveit, A., H. Lund, and J. Olseth, *The design reference year*. Solar Energy: The State of the Art, 1994.
23. Andersen, B., et al., *Meteorological data for design of building and installation: a reference year (extract)*. Report, 1977.
24. Dogniaux, R. and R. Sneyers, *Méthodologie d'analyse statistique des données météorologique en vue de la constitution de périodes-types pour l'application à des problèmes spécifiques*. Rapport des Journées Internationales d'Etude sur chauffage solaire dans le bâtiment, 1977: p. 12-14.
25. Hall, I.J., et al., *Generation of a typical meteorological year*. Sandia Labs., Albuquerque, NM (USA), 1978.
26. Lund, H., *Design Reference Years and test Reference years in Europe, Turkey and Israel*. Department of Buildings and Energy, Technical University of Denmark, 1996.
27. Al-Mofeez, I.A., et al., *Review of typical vs. synthesized energy modeling weather files*. Journal of Renewable and Sustainable energy, 2012. **4** (1): p. 012702.
28. Center, N.C., *Test Reference Year (TRY) Tape Reference Manual, TD 9076*. Asheville, North Carolina, 1976.
29. Crawley, D.B., *Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings?/Discussion*. ASHRAE Transactions, 1998. **104**: p. 498.
30. Standardization, C.-E.C.f., *EN ISO 15927:2002 – Hygrothermal performance of building – Calculation and presentation of climatic data*, Bruxelas, 2002.
31. Finkelstein, J.M. and R.E. Schafer, *Improved goodness-of-fit tests*. Biometrika, 1971: p. 641-645.
32. Kalogirou, S.A., *Generation of typical meteorological year (TMY-2) for Nicosia, Cyprus*. Renewable Energy, 2003. **28** (15): p. 2317-2334.
33. Rahman, I.A. and J. Dewsbury, *Selection of typical weather data (test reference years) for Subang, Malaysia*. Building and Environment, 2007. **42** (10): p. 3636-3641.
34. Cornick, S., R. Djebbar, and W.A. Dalglish, *Selecting moisture reference years using a moisture index approach*. Building and Environment, 2003. **38** (12): p. 1367-1379.
35. Sanders, C., *Environmental Conditions: Heat-Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts (HAMTIE)*. Energy Conservation in Buildings and Community Systems Program, Annex, 1996. **24**.

36. Geving, S., *Moisture Design of Building Constructions: Hygrothermal analysis using simulation models-Part I and II*. Ph. D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering, 1997.
37. Rode, C., *Reference Years for Moisture Calculations: Heat-Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts (HAMTIE)*. Energy Conservation in Buildings and Community Systems Program, Annex, 1996. **24**.
38. Hagentoft, C. and E. Harderup, *Climatic influences on the envelope using the Π factor*. International Energy Agency. Energy Conservation in Buildings and Community Systems Program, Annex, 1996. **24**.
39. Lacy, R.E., *Driving-rain maps and the onslaught of rain on buildings*. Building Research Station, 1965.
40. Lacy, R., *An Index of Exposure to Driving Rain Building Research Station Digest No. 127*. Garston, United Kingdom, 1971.
41. Künzeli, H.M., *Simultaneous heat and moisture transport in building components*. One-and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB-Verlag Stuttgart, 1995.
42. Straube, J.F., *Moisture control and enclosure wall systems*. University of Waterloo, 1998.
43. Choi, E.C., *Wind-driven rain on building faces and the driving-rain index*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999. **79** (1): p. 105-122.
44. Choi, E., *Determination of wind-driven-rain intensity on building faces*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994. **51** (1): p. 55-69.
45. TenWolde, A., *ASHRAE Standard 160 P-Criteria for Moisture Control Design Analysis in Buildings*. ASHRAE Transactions, 2008. **114** (1).
46. Sanders, C., *Proposals for work resulting from the Glasgow meeting: Heat-Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts (HAMTIE)*. Energy Conservation in Buildings and Community Systems Program, Annex, 1993. **24**.
47. Ali Mohamed, F. and H. Hens, *Outdoor Climate: Reference Years. Equivalent Temperature for Condensation*. International Energy Agency. Energy Conservation in Buildings and Community Systems Program, Annex, 1992. **24**.
48. Hukka, A. and H. Viitanen, *A mathematical model of mould growth on wooden material*. Wood Science and Technology, 1999. **33** (6): p. 475-485.
49. Djebbar, R., D. Van Reenen, and M.K. Kumaran. *Indoor and outdoor weather analysis tool for hygrothermal modelling*. in *8th Conference on Building Science and Technology*. Toronto, Ontario, 2001.
50. Salonvaara, M., et al., *Effect of selected weather year for hygrothermal analyses*. Proceedings of thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings XI. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2010.
51. Beaulieu, P., et al., *MEWS methodology for developing moisture management strategies: application to stucco-clad wood-frame walls in North America*. CNRC45213, 2001.

52. EN ISO 15927, *Hygrothermal performance of buildings. Calculation and presentation of climatic data. Part 3: calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data*, 2009.
53. Jensen, D., et al., *Computation of ETo under nonideal conditions*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1997. **123** (5): p. 394-400.
54. Penman, H.L. *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. in *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. The Royal Society, 1948.
55. Priestley, C. and R. Taylor, *On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters*. Monthly weather review, 1972. **100** (2): p. 81-92.
56. Blaney, H.F., *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*, 1952.
57. Valiantzas, J.D., *Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data*. Journal of Hydrology, 2006. **331** (3): p. 690-702.
58. Sousa, I.V.d.A., *Procedimentos na construção do TRY e implicações na simulação higrotérmica*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.
59. Instituto Superior de Engenharia do Porto. [visitado a março de 2017]; Disponível em: <http://meteo.isep.ipp.pt/#>.
60. Google Maps. [visitado a março de 2017]; Disponível em: <https://www.google.pt/maps>.
61. Duffie, J.A. and W.A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. 1980.
62. Collares-Pereira, M. and A. Rabl, *The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values*. Solar energy, 1979. **22** (2): p. 155-164.
63. Maia, H., *Estudo de aplicação de coletores solares na produção de eletricidade e calor para uso doméstico*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013.
64. Allen, R.G., et al., *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO, Rome, 1998. **300** (9): p. D05109.

